



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia**

**Rosa Cecilia Ruiz Bastidas**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Administración  
Palmira, Colombia

2017



# **Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia**

**Rosa Cecilia Ruiz Bastidas**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería Ambiental**

Directora:

Ph.D. Luz Stella Cadavid Rodríguez

Codirector:

Ph.D. Andrés Darío Pantoja Bucheli

Línea de Investigación:

Energías Alternativas

Grupos de Investigación:

Grupo de Investigación Prospectiva Ambiental – Universidad Nacional

Grupo de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Universidad de Nariño

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Administración  
Palmira, Colombia

2017



## **DEDICATORIA**

A Dios por ser mi fortaleza espiritual.  
A mí amada hija Luisa Fernanda por ser mi gran motivación.  
A mis familiares y amigos por la confianza y el apoyo brindados.



## **AGRADECIMIENTOS**

A la profesora Luz Stella Cadavid Rodríguez y al profesor Andrés Darío Pantoja Bucheli, por su dirección, apoyo y dedicación para la realización de este proyecto de investigación.

Al Grupo de Investigación Prospectiva Ambiental – Universidad Nacional de Colombia y al Grupo de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Universidad de Nariño, por brindar apoyo financiero al proyecto y aporte con datos previos fundamentales para la realización de esta investigación. Los aportes gestionados por el grupo de investigación de la Universidad de Nariño correspondieron a recursos del proyecto Análisis de Oportunidades Energéticas en el Departamento de Nariño (ALTERNAR).

A los integrantes del Grupo de Investigación Prospectiva Ambiental, por su apoyo y acompañamiento en la realización de la escala laboratorio de esta investigación.

A la Red Colombiana de Energía de la Biomasa (RedBioCol), por su apoyo en la etapa de implementación, desarrollada durante este proyecto de investigación.

A la Red de Biodigestores Para Latino América y el Caribe (RedBioLac), especialmente al doctor Jaime Martí Herrero por compartir su conocimiento y experiencias en la implementación de biodigestores adaptados al clima frío, y especialmente, por motivarme a llevar la investigación hasta la escala piloto.

A los laboratorios de Investigaciones Ambientales, Nutrición Animal, Microbiología Ambiental y Bioconversiones de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira por permitir desarrollar la parte experimental, los análisis y demás servicios requeridos.

A la Gobernación de Nariño, que por medio del convenio de cooperación con la fundación Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados - Fundación CEIBA, financió mis estudios de maestría.

Finalmente, a todas aquellas personas que me acompañaron, con su amor, cuidados y paciencia, durante el desarrollo de esta investigación, y a la vida por permitirme afrontar con amor y felicidad cada reto presentado en estos dos hermosos años.





## Resumen

La digestión anaerobia es una alternativa promisorio para aprovechar el potencial energético del estiércol bovino, a la vez que contribuye a disminuir los impactos ambientales generados por este residuo. Por tal razón, en este proyecto se evaluó el potencial de producción de biogás usando estiércol bovino como sustrato principal en co-digestión con algunos residuos orgánicos generados en el municipio de Cumbal-Nariño. El proyecto se realizó en 4 etapas: (1) contextualización del problema, y selección de co-sustratos e inóculo a evaluar; (2) recolección de muestras y caracterización de sustrato, co-sustratos e inóculos; (3) evaluación de la producción de biogás en función de co-sustratos e inóculo, y (4) arranque de digestores tubulares de bajo costo en una finca objeto de estudio. La producción de biogás en función de co-sustratos e inóculo presentó diferencias significativas estadísticas. La adición de inóculo y co-sustratos estiércol de cuy y aguas residuales lácteas aumentó significativamente el potencial de biogás. Además, los tratamientos sin inóculo experimentaron acidificación mientras que los tratamientos con inóculo mantuvieron el pH cerca o dentro del intervalo de 6.5 a 7.2, a lo largo del experimento. Finalmente, el manejo y aprovechamiento del estiércol bovino en co-digestión con estiércol de cuy y aguas residuales lácteas, con el uso de biodigestores tubulares de bajo costo, es una alternativa prometedora. Sin embargo, el éxito o el fracaso de dicha alternativa dependen directamente de la disposición de las familias para alimentar los biodigestores diariamente y brindar el cuidado requerido para un funcionamiento óptimo.

**Palabras clave:** biogás, estiércol bovino, co-digestión, estiércol de cuy, aguas residuales lácteas, biodigestor tubular de bajo costo.

## Abstract

Anaerobic digestion is a promising alternative to produce renewable energy from cattle manure, and at the same time to reduce the environmental impacts caused by this waste. Therefore, the goal of this project was to assess the potential for production and use of biogas from cattle manure as principal substrate in co-digestion with some other organic waste generated in the town of Cumbal-Nariño. The project was carried out in 4 stages: (1) contextualizing the problem, and selection of co-substrates and inoculums to evaluate; (2) sampling and characterization of the substrate, co-substrates and inoculum; (3) evaluation of biogas production based on co-substrates and inoculums, (4) the start-up of low-cost tubular digesters in a farm object of study. The production of biogas as a function of co-substrates and inoculum presented significant statistical differences. The addition of inoculum and co-substrates guinea pig manure and dairy wastewater, significantly increased the biogas potential. Furthermore, treatments without inoculum experienced acidification while treatments with inoculum maintained the pH near or within the range 6.5 to 7.2, throughout the experiment. Finally, the management and use of cattle manure in co-digestion with guinea pig manure and dairy wastewater with the use of low-cost tubular digesters showed to be a promising alternative. However, the success or the failure of this alternative depends directly on the willingness of the families to ensure the daily care the digesters need for proper operation.

**Keywords:** biogas, cattle manure, co-digestion, guinea pig manure, dairy wastewater, low-cost tubular biodigester

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Lista de abreviaturas</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes y contexto de la investigación</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>5</b>
2.1    Objetivo general .....	5
2.2    Objetivos específicos .....	5
<b>3. Revisión de literatura</b> .....	<b>7</b>
3.1    Marco teórico .....	7
3.1.1    Digestión anaerobia.....	7
3.1.2    Etapas del proceso de digestión anaerobia .....	7
3.1.3    Microbiología del proceso .....	9
3.1.4    Parámetros clave del proceso de digestión anaerobia .....	11
3.1.5    Potencial Bioquímico de Metano.....	14
3.1.6    Co-digestión anaerobia.....	14
3.1.7    Pretratamiento .....	15
3.1.8    El biogás como producto principal .....	15
3.1.9    Otros productos de valor.....	16
3.2    Estado del arte .....	16
3.2.1    Principales sustratos y co-sustratos utilizados .....	16
3.2.2    Avances en la investigación de DA.....	17
3.2.3    Digestión anaerobia de estiércol bovino .....	18
3.2.4    Manejo de los residuos sólidos orgánicos en el departamento de Nariño .....	20
3.3    Normatividad asociada.....	22
<b>4. Materiales y métodos</b> .....	<b>25</b>
4.1    Contextualización del problema, y selección de co-sustratos e inóculo a evaluar.	

4.2	Recolección de muestras y caracterización del sustrato, co-sustratos e inóculo seleccionados.....	26
4.3	Evaluación de la producción de biogás en función de nutrientes, co-sustratos e inóculo.....	27
4.3.1	Potencial de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes... ..	29
4.3.2	Efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del estiércol bovino.....	31
4.3.3	Análisis estadístico.....	32
4.4	Arranque del proceso de digestión anaerobia a escala piloto. ....	32
4.5	Métodos analíticos .....	33
<b>5.</b>	<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>35</b>
5.1	Contextualización del problema, y selección de co-sustratos e inóculo a evaluar	35
5.1.1	Descripción del área de estudio .....	35
5.1.2	Caracterización de la actividad ganadera.....	36
5.1.2.1	Resultados de las encuestas.....	37
5.1.3	Co-sustratos e inóculo a utilizar.....	43
5.1.3.1	Co-sustratos a utilizar.....	43
5.1.3.2	Inóculo a utilizar .....	44
5.2	Caracterización del sustrato y co-sustratos.....	45
5.3	Producción de biogás en función de nutrientes, co-sustratos e inóculo.....	46
5.3.1	Producción de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes	46
5.3.1.1	Comportamientos de los parámetros de control en la evaluación del potencial de metano de co- sustratos y el efecto de la adición de nutrientes .....	50
5.3.1.2	Conclusiones de la evaluación del potencial de metano de co- sustratos y el efecto de la adición de nutrientes.....	54
5.3.2	Efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en la producción de biogás del estiércol bovino.....	55
5.3.2.1	Comportamiento de los parámetros de control al evaluar el efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del estiércol bovino	59
5.3.2.2	Conclusiones de la evaluación del efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del estiércol bovino .....	63
5.4	Arranque del proceso de digestión anaerobia a escala piloto. ....	64
5.4.1	Diseño del sistema piloto.....	64
5.4.2	Instalación de los biodigestores tubulares de bajo costo .....	67
5.4.3	Seguimiento escala piloto.....	75
5.4.3.1	Seguimiento a la alimentación de los biodigestores .....	75
5.4.3.2	Toma de muestras para el análisis de los parámetros de control .....	77
5.4.3.3	Producción de biogás del sistema a escala piloto.....	77
5.4.3.4	Comportamiento de los parámetros de control de la digestión anaerobia en la evaluación a escala piloto .....	79
5.4.3.5	Incremento de la temperatura.....	82

---

5.4.3.6 Calidad del digestato .....	83
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>85</b>
6.1 Conclusiones.....	85
6.2 Recomendaciones.....	86
<b>Bibliografía .....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo B. Análisis elemental del estiércol de cuy. ....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo C. Análisis físico-químico de aguas residuales lácteas.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexo D. Análisis estadístico para la prueba efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en la producción de metano del estiércol bovino .....</b>	<b>103</b>
<b>Anexo E. Certificado de divulgación de resultados en evento científico de carácter internacional.....</b>	<b>105</b>
<b>Anexo F. Certificado de divulgación de resultados en evento científico de carácter nacional.....</b>	<b>107</b>



## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 3-1.</b> Esquema de reacciones en el proceso de DA .....	8
<b>Figura 3-2.</b> Publicaciones en el tema de DA en diferentes países desde 1944 a 2015 ..	17
<b>Figura 3-3.</b> Principales co-sustratos utilizados en DA de EB.....	20
<b>Figura 3-4.</b> Distribución de municipios por tipo de sistema de disposición final en Colombia .....	21
<b>Figura 3-5.</b> Municipios por sitio donde se realiza la disposición final de residuos sólidos en Nariño.....	21
<b>Figura 3-6.</b> Tratamiento de residuos en zona rural de departamento de Nariño.....	22
<b>Figura 4-7.</b> Esquema metodológico de la investigación .....	25
<b>Figura 4-8.</b> Medición de biogás por la técnica de desplazamiento de agua. ....	28
<b>Figura 4-9.</b> Lodo granular .....	30
<b>Figura 4-10.</b> Montaje de los reactores con EC .....	30
<b>Figura 4-11.</b> Montaje de los reactores con ARL.....	31
<b>Figura 5-12.</b> Uso al biogás propuesto por la comunidad .....	38
<b>Figura 5-13.</b> Número de familias que conforman las asociaciones lecheras .....	39
<b>Figura 5-14.</b> Familias que usan estabulado del ganado bovino .....	41
<b>Figura 5-15.</b> Manejo del estiércol bovino en las fincas.....	41
<b>Figura 5-16.</b> Dedicación de las familias a alguna actividad agrícola .....	42
<b>Figura 5-17.</b> Tipo de actividad agrícola desarrollada por las familias .....	42
<b>Figura 5-18.</b> Efecto de los nutrientes en el potencial de metano del EC y ARL.....	46
<b>Figura 5-19.</b> Diagrama de cajas y alambres para el potencial de metano de los co-sustratos EC y ARL CN y SN .....	48

<b>Figura 5-20.</b> Reactores con ARL en los días con mayor producción de biogás, blanco en el extremo derecho. ....	49
<b>Figura 5-21.</b> Inóculo ubicado en la parte superior (a) y capa grasosa en la superficie (b) en reactor con ARL.....	49
<b>Figura 5-22.</b> Comportamiento de pH en la DA de EC (a) y ARL (b), CN y SN .....	50
<b>Figura 5-23.</b> Comportamiento de los AGVs en la DA de EC y ARL, CN y SN .....	51
<b>Figura 5-24.</b> Comportamiento del amoníaco en la DA de EC y ARL, CN y SN .....	53
<b>Figura 5-25.</b> Comportamiento de la DQOs en la DA de EC y ARL, CN y SN.....	54
<b>Figura 5-26.</b> Potencial de metano de la co-digestión de EB con EC y ARL, con y sin inóculo .....	55
<b>Figura 5-27.</b> Diagrama de cajas y alambres para el potencial de metano de EB con los co-sustratos EC y ARL con y sin inóculo.....	58
<b>Figura 5-28.</b> Comportamiento de pH en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo .....	59
<b>Figura 5-29.</b> Comportamiento de los AGVs en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo.....	61
<b>Figura 5-30.</b> Comportamiento del amoníaco en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo.....	62
<b>Figura 5-31.</b> Comportamiento de la DQOs en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo.....	63
<b>Figura 5-32.</b> Finca seleccionada para implementación de biodigestores tubulares de bajo costo .....	64
<b>Figura 5-33.</b> Sistema de cría de cuyes en finca seleccionada para implementación de biodigestores tubulares de bajo costo .....	65
<b>Figura 5-34.</b> Generación de ARL en las instalaciones de uno de los tanques de frío perteneciente a una de las asociaciones del municipio de Cumbal .....	66
<b>Figura 5-35.</b> Dimensiones de la zanja para implementación de biodigestores de bajo costo, dependiendo del ancho de rollo .....	67
<b>Figura 5-36.</b> Forma de la zanja con sus dos cortes y dimensiones.....	68
<b>Figura 5-37.</b> Zanjas con aislante de icopor (a) y aislante de guadua (b).....	68
<b>Figura 5-38.</b> Cortado del plástico tubular para la construcción de los biodigestores. ....	69
<b>Figura 5-39.</b> Instalación para la salida de biogás.....	69
<b>Figura 5-40.</b> Plástico con salida de biogás y mezclador instalados .....	70



---

<b>Figura 5-41.</b> Amarre del biodigestor a los tubos de entrada (a) y salida de material (b).	71
<b>Figura 5-42.</b> Instalación de los tubos de entrada y salida del material en la zanja .....	71
<b>Figura 5-43.</b> Inflado y organización del biodigestor en la zanja.....	72
<b>Figura 5-44.</b> Instalación para la conducción del biogás.....	73
<b>Figura 5-45.</b> Válvula de seguridad, manómetro y “te” para liberación de agua acumulada en la tubería .....	74
<b>Figura 5-46</b> Tubería de conducción de biogás hasta el reservorio .....	74
<b>Figura 5-47.</b> Cubierta con plástico tipo invernadero .....	75
<b>Figura 5-48.</b> Estufa diseñada para funcionar con biogás, funcionando con el biogás producido por B1.....	76
<b>Figura 5-49.</b> Biodigestores B1 (a) y B2 (b) durante el tercer mes de funcionamiento.....	77
<b>Figura 5-50.</b> Comportamiento de pH en los biodigestores B1 y B2.....	79
<b>Figura 5-51.</b> Comportamiento de la alcalinidad en los biodigestores B1 y B2 .....	80
<b>Figura 5-52.</b> Comportamiento del amonio en los biodigestores B1 y B2 .....	81
<b>Figura 5-53.</b> Comportamiento de la DQOs en los biodigestores B1 y B2.....	82



## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 3-1.</b> Reportes de DA de EB con algunos co-sustratos.....	19
<b>Tabla 4-2.</b> Tratamientos para evaluar el potencial de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes.....	29
<b>Tabla 4-3.</b> Diseño experimental para la evaluación de la producción de biogás en función de co-sustratos e inóculo.....	32
<b>Tabla 5-4.</b> Pisos térmicos presentes en el municipio de Cumbal.....	36
<b>Tabla 5-5.</b> Cantidad de ganado bovino por rangos de edad en el municipio de Cumbal	37
<b>Tabla 5-6.</b> Reses por familia y otros animales domésticos en las diferentes asociaciones .....	40
<b>Tabla 5-7.</b> Cultivos que se producen en el Municipio de Cumbal. ....	43
<b>Tabla 5-8.</b> Caracterización de sustrato y co-sustratos.....	45
<b>Tabla 5-9.</b> Potencial de metano de EC y ARL CN y SN .....	47
<b>Tabla 5-10.</b> Potencial de metano del EB comparado con los co-sustratos EC y ARL y, con y sin inóculo.....	57
<b>Tabla 5-11.</b> Parámetros evaluados a los digestatos de B1 y B2 y su comparación con la norma NTC 5167 .....	83



## Lista de abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
AGVs	Ácidos Grasos Volátiles
ALTERNAR	Análisis de Oportunidades Energéticas en el Departamento de Nariño
APHA	American Public Health Association
ARL	Aguas Residuales Lácteas
B1	Biodigestor 1
B2	Biodigestor 2
CN	Con Nutrientes
CO	Carga Orgánica
DA	Digestión Anaerobia
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DQOs	Demanda Química de Oxígeno Soluble
EB	Estiércol Bovino
EC	Estiércol de Cuy
FDN	Fibra Detergente Neutra
FDA	Fibra Detergente Ácida
FEDEGAN	Federación Colombiana de Ganaderos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GTC	Guía Técnica Colombiana
h	Hora
ha	Hectárea
IRENA	Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
ICA	Instituto Colombiano Agrícola
m s.n.m	Metros Sobre el Nivel del Mar
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
mm	Milímetro
MO	Materia Orgánica
Nml CH <sub>4</sub>	Mililitros de Metano a Condiciones Estándar
NR	No Responde

---

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
NS	No Sabe
NTC	Norma Técnica Colombiana
NTK	Nitrógeno Total Kjeldalh
p – SA	Páramo Sub – Andino
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
PIB	Producto Interno Bruto
PVC	Policloruro de Vinilo
R S/I	Relación Sustrato/Inóculo
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje
SN	Sin Nutrientes
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
t	Tonelada
TJ	Terajulio
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico

## Introducción

La Digestión Anaerobia (DA) es un tratamiento biológico, ampliamente utilizado a nivel mundial (Zarkadas, Sofikiti, Voudrias, & Pilidis, 2015), útil para la recuperación de energía en forma de biogás y la estabilización de la Materia Orgánica (MO) (Cata Saady & Massé 2015; Mata-Alvarez et al. 2014). La MO manejada mediante DA puede provenir de diferentes actividades, pues una gran variedad de residuos son aptos como sustrato para ser tratados mediante esta tecnología (Kwietniewska & Tys 2014; Wu et al. 2011). Uno de los sustratos más utilizados es el estiércol, por lo que la DA es considerada una alternativa promisorio para mitigar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de este residuo (Hristov et al., 2013).

Particularmente, el Estiércol Bovino (EB) es uno de los principales residuos generados en Colombia, que al no ser aprovechado produce impactos en el ambiente. Según el Atlas de Biomasa Residual Colombia (2010), en Colombia se generan 99.168.608 [t/año] de EB, las cuales, mediante DA, representan un potencial de 84.256 Terajulio/año [TJ/año] (UPME, IDEAM, COLCIENCIAS, 2014). Dicho potencial no solo no es aprovechado, sino que tales residuos incrementan la problemática mundial de emisión de GEI.

Aunque la tecnología de DA se ha establecido como una importante fuente de energía renovable en el sector rural, y el EB es uno de los sustratos más utilizados (Mata-Alvarez et al., 2014), en países subdesarrollados como Colombia el avance en este tipo de prácticas es muy escaso.

El carente desarrollo de esta tecnología en el país conlleva a situaciones como la que se da en el municipio de Cumbal, en el departamento de Nariño. En este municipio la explotación de ganado bovino lechero es una de las principales actividades productivas (Gobernación de Nariño, 2012), la cual genera una importante cantidad de EB que actualmente no cuenta con un sistema de manejo y aprovechamiento, desperdiciando así su potencial energético y contribuyendo a la emisión de GEI.

Ahora bien, uno de los primeros pasos para promover la implementación de la tecnología de DA en países donde su desarrollo es escaso, es la realización de proyectos de investigación que permitan conocer su funcionamiento y así poder realizar propuestas sólidas para posibles implementaciones. Por esto, este proyecto de investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial de producción de biogás a partir del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal (departamento de Nariño), con miras a proponer la DA como alternativa de manejo y aprovechamiento de este residuo.

Este proyecto de investigación se realizó inicialmente con la contextualización del problema de investigación, en la cual, gracias a la interacción con la comunidad del municipio de Cumbal y teniendo en cuenta sus necesidades e intereses, se logró definir los co-sustratos e inóculo a utilizar en la investigación; luego, por medio de ensayos de laboratorio y con el apoyo de laboratorios especializados se realizó la caracterización de sustrato, co-sustratos e inóculos definidos para las pruebas experimentales; seguidamente, se procedió a realizar la evaluación a escala laboratorio para identificar la mezcla de sustrato, co-sustratos e inóculo que generara los mejores resultados en términos de producción de biogás; y finalmente, aplicando los resultados de la escala de laboratorio, se realizó la implementación y el seguimiento al arranque, a dos biodigestores tubulares de bajo costo en una finca seleccionada del municipio de Cumbal.

En este documento se presentan inicialmente los antecedentes y contexto de la investigación, donde se plantea la necesidad del desarrollo del proyecto de investigación y los beneficios ambientales y sociales que representa su implementación; luego se presentan los elementos teóricos que sustentan la investigación, el estado actual y los principales avances, que se relacionan directamente con el tema de investigación; después se describen los procedimientos y técnicas que se utilizaron para alcanzar los objetivos planteados; posteriormente, se presentan y analizan los principales resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto de investigación; y finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.



# 1. Antecedentes y contexto de la investigación

La producción animal es una fuente importante de emisión de GEI en todo el mundo. La contribución del ganado a las emisiones mundiales de los GEI antropogénico representa entre el 7 y el 18 por ciento de las emisiones totales, generando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) a lo largo del proceso productivo (Hristov et al., 2013). Del total de emisiones del sector pecuario a nivel mundial el ganado bovino de carne y el de leche ocupan los primeros lugares, superando cada uno por más del triple al tercero en la lista, el de los cerdos (Hristov et al., 2013).

Paralelamente a esta situación, la demanda energética se incrementa constantemente, según la Agencia Internacional de Energía se espera que la demanda mundial de energía aumente hasta un 55% en 2030. Al aumentar el requerimiento energético, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando rápidamente, pues el sector energético produce la mayor parte de las emisiones de GEI. El 80% de los GEI, generados por el sector energético, provienen del consumo mundial de energía basado en combustibles fósiles (International Energy Agency, 2014).

La problemática de la emisión de GEI, la creciente demanda energética, los esfuerzos por mitigar los impactos ambientales generados por los combustibles convencionales y la intención de mejorar los niveles de vida han impulsado el desarrollo de energías renovables (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015). En este contexto, la DA se convierte en una alternativa promisoría para mitigar las emisiones de GEI del estiércol y generar energía renovable.

En el departamento de Nariño la ganadería bovina es una de las principales actividades económicas. La producción de leche en el departamento aporta aproximadamente el 27% del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agropecuario, vinculando la actividad a 39.862 productores y a 159.448 personas de forma directa en la producción de leche; la región con la mayor producción de leche es la Ex-provincia de Obando con el 49% de la producción departamental (Gobernación de Nariño, 2012). La exprovincia de Obando cuenta con el 41.22% (160.348) de las cabezas de ganado bovino del departamento (388.963) (Gobernación de Nariño, 2012), de las cuales el 18,36% se encuentran en el municipio de Cumbal (Gobernación de Nariño, 2014), que es el municipio nariñense con el mayor número de cabezas de ganado bovino después de Pasto.

Por otra parte, en los municipios de Nariño, como en el caso de Cumbal, las principales fuentes de energía utilizadas son energía eléctrica, combustibles fósiles y leña, que generan impactos ambientales importantes. El gas propano es el principal combustible utilizado para la cocción de alimentos (45%), sin embargo, existe un alto porcentaje de viviendas (54%) en las que se emplea la leña (PERS-Nariño, 2014). Por su parte, la obtención de la biomasa leñosa genera una alta presión sobre los recursos forestales, de esta forma se afecta constantemente la cobertura vegetal de bosques y de páramos debido a que se deben utilizar grandes cantidades de vegetación, pues cocinar en estufas a base de leña es un proceso que tiene una eficiencia energética muy baja (15.5% aproximadamente). Además, la contaminación del aire por el humo puede ocasionar problemas de salud pública, por ejemplo, infecciones oculares y enfermedades respiratorias (Ashkuzzaman & Poulsen, 2011). A estos problemas se añade que el uso de estas energías convencionales representa un gasto económico permanente e importante para los pobladores de estos municipios, que en muchos casos es difícil de asumir.

Particularizando en el municipio de Cumbal, la DA se puede contemplar como alternativa biotecnológica para el manejo y aprovechamiento del EB. Alternativa que de ser sometida a la investigación necesaria para ser adaptada a las condiciones climáticas del municipio puede convertirse en una opción que contribuya a la disminución de los impactos ambientales asociados a la actividad ganadera, y que a la vez permita disponer de una fuente de energía renovable que pueda ser aprovechada para beneficio de la comunidad.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el potencial de producción de biogás a partir del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal del departamento de Nariño, con miras a proponer la digestión anaerobia como alternativa de manejo y aprovechamiento de este residuo.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Estudiar el efecto del inóculo y posibles co-sustratos en la digestión anaerobia del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal.
2. Realizar el arranque del proceso de digestión anaerobia a escala piloto, en dos biodigestores tubulares de bajo costo.



## 3. Revisión de literatura

### 3.1 Marco teórico

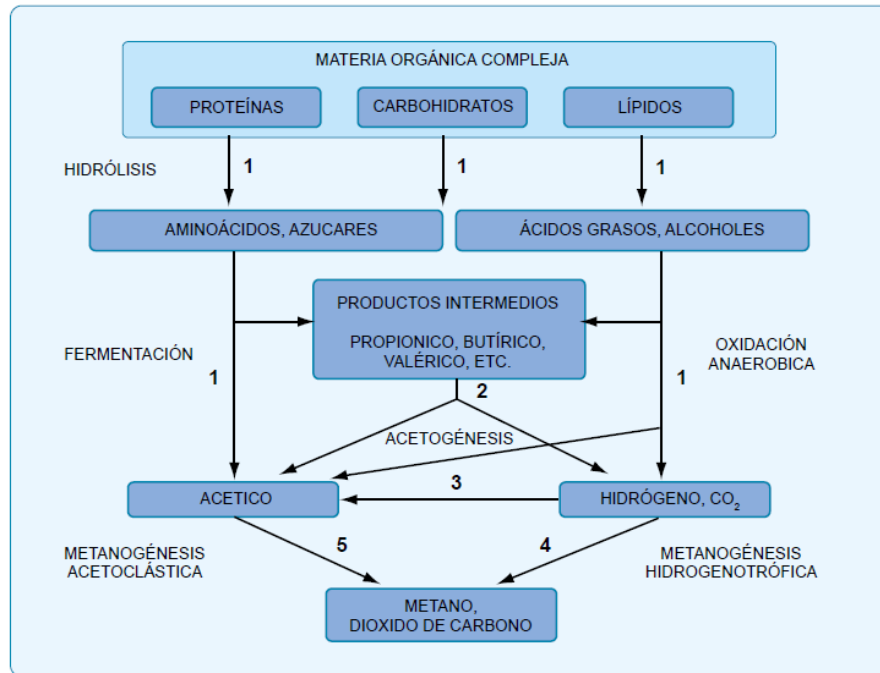
#### 3.1.1 Digestión anaerobia

La DA es un tratamiento biológico realizado en ausencia de oxígeno, útil para la recuperación de energía en forma de biogás y la estabilización de la MO (Mata-Alvarez et al., 2014). Una característica importante de la DA es que puede ser aplicada para el tratamiento de diversos residuos orgánicos (Kwietniewska & Tys, 2014; Wu et al., 2011). El biogás producido mediante DA, compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y  $\text{CO}_2$ , puede ser aprovechado con diferentes tecnologías para la conversión en energía eléctrica, en motores de combustión, en lámparas de iluminación o en quemadores y calderas (Walker et al., 2009). Por su parte, la MO estabilizada mediante DA se convierte en un material rico en nutrientes y con una carga de patógenos reducidos (Ileleji et al., 2015). Dicho material puede ser utilizado directamente para la recuperación de suelos o para la producción de compost. Además, la DA es considerada una alternativa promisoriosa para mitigar las emisiones de los GEI del estiércol (Hristov et al., 2013). Por sus cualidades, la DA es una tecnología que permite obtener energía renovable y ayuda a afrontar la problemática alrededor de la generación de residuos.

#### 3.1.2 Etapas del proceso de digestión anaerobia

De acuerdo con Gould (2015) el proceso de DA se da en 4 etapas (figura 3-1):

**Etapas 1.** Hidrólisis: Durante esta etapa los polímeros, proteínas, grasas y carbohidratos, se descomponen en moléculas más pequeñas, tales como aminoácidos, ácidos grasos, y azúcares simples.



**Figura 3-1.** Esquema de reacciones en el proceso de DA

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1. Bacterias fermentativas; 2. Bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3. Bacterias homoacetogénicas; 4. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; y 5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Fuente: (Pavlostathis & Giraldo-Gómez, 1991)

**Etapa 2.** Fermentación o acidogénesis: Los microorganismos acidogénicos toman los productos de la hidrólisis para producir NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, ácidos grasos volátiles cortos, ácidos carbónicos, alcoholes, y pequeñas cantidades de otros subproductos.

**Etapa 3.** Acetogénesis: Los microorganismos acetógenos catabolizan muchos de los productos creados en acidogénesis en ácido acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, que son utilizados por los metanógenos para crear metano.

**Etapa 4.** Metanogénesis: En esta, la etapa final del proceso, los metanógenos crean metano a partir de los productos finales de la acetogénesis, así como de algunos de los productos intermedios de la hidrólisis y la acidogénesis. A partir de los dos productos principales de las tres primeras etapas de la DA (el ácido acético y el dióxido de carbono), se dan dos vías para la generación de metano (ecuación 1 y ecuación 2).



Según Gould (2015), el principal mecanismo para crear metano en la metanogénesis es el camino en el que intervenga el ácido acético. Este camino produce metano y  $\text{CO}_2$ , los dos productos principales de la DA.

### 3.1.3 Microbiología del proceso

Desde el punto de vista microbiológico, el proceso de DA puede dividirse según la función de sus principales dominios microbianos, Bacteria y Archaea. Los microorganismos del dominio bacteria son los encargados de las etapas de hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis; estos microorganismos se encargan de metabolizar diversos sustratos y pueden resistir amplias variaciones en las condiciones de operación. Dentro de este grupo se encuentran principalmente los filos *Firmicutes* (especialmente los del orden *Clostridiales*), *Bacteroidetes*, y *Actinobacteria*. Por su parte las arqueas se encargan principalmente de la metanogénesis (Mata-Alvarez et al., 2014).

En la metanogénesis, las Archaeas se clasifican de acuerdo con los dos sustratos utilizados para la producción de metano. Por un lado, las metanógenas acetoclásticas estrictas, que comprenden el género *Methanosaeta*, las cuales producen metano a partir de acetato. Por otro lado, están las metanógenas hidrogenotróficas que comprenden los órdenes Methanobacteriales, Methanomicrobiales y Methanococcales, las cuales producen metano a partir de hidrógeno y  $\text{CO}_2$ . También, entre los metanógenos se encuentra el género *Methanosarcina* considerado un metanógeno mixotrófico ya que puede utilizar acetato o  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  para producir metano (Mata-Alvarez et al., 2014).

#### 3.1.3.1 Factores que afectan la diversidad microbiana

La diversidad microbiana en el proceso de DA se ve afectada por diferentes factores (Mata-Alvarez et al., 2014). La temperatura es una de las principales variables que afectan las vías metabólicas que se dan durante el proceso, ya que dependiendo de los rangos en los que este se desarrolle, se propiciarán las condiciones para el crecimiento de diferentes

micoorganismos. La composición del sustrato también incide en dicha diversidad, algunos investigadores sugieren que la diversificación del sustrato y el mejor equilibrio nutricional conducen a una comunidad microbiana más versátil y robusta, capaz de soportar alteraciones del sistema y mejorar la producción de biogás.

Otros factores que influyen en el desarrollo de la comunidad microbiana son la tasa de Carga Orgánica (CO) y el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH). Una sobrecarga en el reactor puede ocasionar una disminución de la diversidad bacteriana. Por su parte, un alto TRH (50 días) favorece la presencia de algunos microorganismos como los pertenecientes a los Clostridiales, mientras a menores TRH (40 y 30 días) se favorecen microorganismos como Bacteroidetes y Clostridiales.

Ahora bien, si el proceso se desarrolla en una o dos fases la composición microbiana será diferente; en un sistema de una sola fase los Bacteroidetes se han observado como dominantes, mientras que, en un sistema en dos fases se han observado Firmicutes como el *phylum* dominante en la etapa de hidrólisis y acidogénesis.

### **3.1.3.2 Interacción de los microorganismos**

Una de las interacciones que se destacan en el proceso de DA es la sintrofia. Esta interacción se refiere a la cooperación entre dos microorganismos para degradar un compuesto de difícil degradación. La sintrofia entre acidógenos y metanógenos genera una alta tasa de degradación de diferentes sustratos, lo cual significa grandes cantidades de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> como producto final. El equilibrio entre estos dos grupos de microorganismos mantiene la estabilidad del proceso. Esta interacción es facilitada por la acumulación de diferentes capas bacterianas denominadas gránulos. Un gránulo está compuesto por capas donde en el núcleo están las metanogénicas; en el intermedio las acetogénicas y en el exterior las acidogénicas. La granulación es un método muy común para proteger a los microorganismos anaerobios, así como para aumentar el rendimiento de un digestor. Además, la granulación hace que el proceso soporte mayores tasas de CO y cargas tóxicas (Amani et al., 2010).



### **3.1.4 Parámetros clave del proceso de digestión anaerobia**

#### **3.1.4.1 Carga orgánica**

La CO se refiere a la cantidad de MO tratada mediante el proceso de DA en un reactor con un volumen determinado en un tiempo definido (IDAE, 2007). Al aumentar la CO se incrementa el rendimiento del biogás hasta llegar a un límite que puede causar la inhibición; cuando es muy alta se da una actividad de hidrólisis/acidogénesis que supera la capacidad de las bacterias metanogénicas para transformar los productos de estas dos etapas, de manera que se aumenta la concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) que pueden conducir a una acidificación irreversible (Mao et al., 2015). La CO se determina de acuerdo con el tipo de sustrato y es un parámetro determinante para el diseño de un sistema de DA (Varnero Moreno, 2011), ya que influye en la estabilidad del proceso y la tasa de producción de biogás.

#### **3.1.4.2 Tiempo de retención hidráulico**

El tiempo TRH es el periodo que permanece el sustrato en el reactor bajo la acción de los microorganismos (IDAE, 2007). El TRH depende de la biodegradabilidad del sustrato, de la tasa de crecimiento microbiano y de la temperatura del proceso (Mao et al., 2015). Cuando el TRH es corto puede conducir a la acumulación de AGVs; por el contrario, TRH prolongados ocasionan un uso ineficiente de los componentes del digester.

#### **3.1.4.3 pH**

El pH es un parámetro muy importante durante la DA que no solo afecta la actividad microbiana, sino que también determina las vías metabólicas (Yan, Selvam, & Wong, 2014). Su importancia se debe a que las bacterias anaerobias necesitan diferentes intervalos de pH para su crecimiento. Las bacterias fermentativas, por ejemplo, se adaptan a pH entre 4.0-8.5; las metanogénicas son más estrictas, y el rango favorable está entre 6.5 a 7.2 (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014). Sin embargo, algunos autores recomiendan que el proceso de desarrolle a un pH de 7.4 (Brown & Li, 2013) o entre 6.8 y 7.4 (Mao et al., 2015).

#### **3.1.4.4 Temperatura**

La temperatura es una de las condiciones más importantes que influyen en la DA. Este parámetro repercute en la actividad de enzimas y co-enzimas, en el rendimiento de metano

y en la calidad del material digerido o digestato. Algunos autores señalan que la DA presenta mejores rendimientos a condiciones termofílicas (50 - 60 °C), pero otros advierten que bajo estas condiciones el proceso es más sensible a cambios ambientales que cuando se maneja en condiciones mesofílicas (30 - 40 °C), por ejemplo, los cambios en la temperatura en condiciones termofílicas deben ser inferiores a 0.6 °C/día para mantener una digestión estable (Zhang et al., 2014). Además, bajo condiciones termofílicas se presenta una menor diversidad microbiana, una baja calidad en el efluente, el sistema requiere mayor inversión, se da una metanogénesis pobre y un mayor consumo de energía (Mao et al., 2015). Con el fin de incrementar la producción de biogás, algunos autores proponen manejar el proceso de DA en dos fases: manejar la primera etapa (hidrólisis/acidogénesis) bajo condiciones termofílicas y la segunda etapa (metanogénesis) bajo condiciones mesofílicas.

La DA también se ha estudiado en el rango hipertermófilo (> 60 °C), temperatura ambiente y a bajas temperaturas. En condiciones hipertermófilas, se presenta una mayor eficiencia en el tratamiento de sustratos que contienen altas concentraciones de proteínas, lípidos, y la materia sólida no biodegradable. Sin embargo, los microorganismos de DA son muy sensibles a los cambios de temperatura, lo cual afecta la producción de hidrógeno y metano, y la descomposición de materiales orgánicos (Mao et al., 2015). Cuando se realiza el proceso a temperatura ambiente, la ventaja es que no se requiere consumo de energía para calentar, aunque se da una menor producción de metano y menor estabilidad que en el proceso mesofílico debido a los efectos por los cambios de temperatura en el ambiente.

Por su parte, la DA bajo condiciones psicrófilas (< 20 °C), también ha sido aplicada con resultados prometedores. Con la disminución de la temperatura aumenta el TRH; disminuyen la producción de AGVs, la tasa de utilización de sustrato, la tasa metabólica de los microorganismos y los rendimientos de metano (Mao et al., 2015). Sin embargo, también se ha encontrado que el contenido de biogás aumenta con la disminución de la temperatura como lo reportan Alvarez & Liden, (2008) quienes encontraron que el porcentaje de metano se incrementó de 49.9 a 61.1% en procesos evaluados a temperaturas de 35 y 18 °C respectivamente. Diferentes estudios se han realizado para mejorar la producción de biogás a bajas temperaturas como el aislamiento de bacterias metanogénicas psicrófilas para realizar bioaumentación o la adaptación de bacterias metanogénicas mesofílicas a bajas temperaturas (Dhaked, Singh, & Singh, 2010).

Además, buscando llevar la tecnología a zonas con bajas temperaturas y a usuarios con escasos recursos, se han desarrollado estrategias para aprovechar la ganancia solar pasiva y lograr un incremento de la temperatura en digestores tubulares de bajo costo (J. Martí-Herrero et al., 2014).

#### **3.1.4.5 Inóculo**

La calidad y cantidad de inóculo es un factor clave para la puesta en marcha del proceso de DA. Una cantidad de inóculo adecuada mejora la etapa de hidrólisis, acelera la producción de biogás, reduce el tiempo de funcionamiento y contribuye a evitar la acidificación (Kawai et al., 2014).

La Relación Sustrato/Inóculo (R S/I) varía de acuerdo con el sustrato empleado en el proceso de DA. De acuerdo con los datos recopilados por Xu et al. (2012), se recomiendan diferentes valores de dependiendo del sustrato utilizado: así, para la DA de hierba, se sugiere 1.0 Sólidos Volátiles (SV) (SV/SV); para el estiércol, 0.02 (SV/SV) y 0.13 (SV/SV) para los residuos de alimentos. Una relación de inóculo inferior al 20% (peso/peso) fue recomendada por Xu et al. (2012) para la primera etapa de la DA de residuos de alimentos, teniendo en cuenta los costos de operación y la eficiencia de la descomposición. Cuando la cantidad de inóculo no es adecuada se puede presentar inhibición por la alta concentración de sustrato (Raposo et al., 2009).

#### **3.1.4.6 Relación C/N**

Dentro del proceso de DA, la relación carbono/nitrógeno (C/N) es el factor relacionado con el equilibrio de nutrientes requerido por las bacterias anaerobias. Una relación C/N muy alta no proporciona el nitrógeno suficiente para mantener la biomasa celular. Por otro lado, una relación C/N muy baja aumenta el riesgo de inhibición por amoníaco, que es tóxico para los metanógenos y causa insuficiente utilización de fuentes de carbono. Cantidades insuficientes de carbono o nitrógeno pueden limitar el rendimiento de DA (Mao et al., 2015).

Se reportan diferentes valores y rangos considerados como óptimos para el proceso, valores como 27.2; 27-32; 20-30; 20; y datos más bajos como 15-20; 19.6; 15.8, en estudios realizados para diferentes sustratos e inóculos (Zhang et al., 2014). Es importante mencionar que relaciones por encima de 30 pueden ocasionar un menor rendimiento de metano durante la DA. Un contenido óptimo de carbono tiene un efecto positivo para evitar la inhibición por amoníaco (Zhang et al., 2014).

### 3.1.5 Potencial Bioquímico de Metano

El Potencial Bioquímico de Metano (PBM) es una prueba utilizada para evaluar la biodegradabilidad de compuestos orgánicos bajo condiciones anaerobias. Esta prueba permite determinar el valor experimental de producción de metano de un determinado sustrato, e influye tanto en el diseño como en los detalles económicos de una planta de biogás (Angelidaki et al., 2009). De acuerdo con Angelidaki et al. (2009), para la realización de esta prueba se debe hacer una caracterización detallada del sustrato a evaluar; el tamaño de las partículas de sustrato se considera fundamental; se debe contar con un buen inóculo en las proporciones adecuadas; y se necesita un medio de nutrientes para que los microorganismos anaerobios trabajen en óptimas condiciones. De esta manera, el PBM se constituye en la prueba inicial cuando se pretende emprender un proyecto de producción de biogás de un determinado sustrato.

### 3.1.6 Co-digestión anaerobia

La co-digestión anaerobia se define como la DA de dos o más sustratos de diferente origen, que permite el desarrollo eficiente del proceso debido al comportamiento sinérgico de los sustratos utilizados (Cendales Ladino, 2011), los cuales compensan las falencias que cada uno presenta al realizar el proceso de DA por separado (Lin, Wang, Li, & Xiao, 2011).

La co-digestión anaerobia se ha desarrollado como consecuencia de los inconvenientes generados en la DA de sustratos individuales, debido a sus propiedades. Entre las propiedades que causan inconvenientes se destacan: la baja CO presentado por los lodos de depuradora; las altas concentraciones de nitrógeno del estiércol de animales, que pueden inhibir los microorganismos metanógenos; los materiales indebidos, así como una relativamente alta concentración de metales pesados, presentes en la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y la escasez de nitrógeno de los desechos de cultivos y agroindustriales. Precisamente, la co-digestión anaerobia ayuda a resolver estos problemas gracias a la adición de co-sustratos (Mata-Alvarez et al., 2014).

La co-digestión de residuos orgánicos genera beneficios como: proporciona equilibrio de nutrientes (relación C/N, macro y micro nutrientes) (Zarkadas et al., 2015); contribuye a diluir inhibidores de compuestos tóxicos (Brown & Li, 2013); genera mayor capacidad de amortiguamiento gracias al aumento de amoníaco a partir de los residuos orgánicos;

mejora las tasas máximas aceptables de CO; aumenta el rendimiento de biogás con respecto al obtenido de un solo sustrato; incrementa la calidad del digestato (Mao et al., 2015) y mejora la estabilidad del proceso (Agyeman & Tao, 2014). Estos beneficios, que se presentan tanto a escala banco como a escala piloto (Ashekuzzaman & Poulsen, 2011), han permitido la evolución de las investigaciones sobre el tema en los últimos años.

### **3.1.7 Pretratamiento**

Se han desarrollado diferentes métodos para aumentar la biodegradabilidad de los sustratos en el proceso de DA. Los más comunes son los tratamientos mecánicos con un 33% de incidencia, seguido de los pre-tratamientos térmicos (24%) y pre-tratamientos químicos (21%) (Mata-Alvarez et al., 2014). La reducción del tamaño de partícula es un pretratamiento importante para mejorar el rendimiento de la DA, pues el tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre la velocidad de la hidrólisis, que es considerado el paso limitante del proceso anaerobio. Dicha reducción depende del sustrato, pero no se debe exceder, pues esto podría ocasionar problemas ya que partículas muy pequeñas pueden acelerar la acumulación de AGVs. De tal forma, un tamaño recomendado para las partículas está alrededor de 0.6 mm (Zhang et al., 2014).

### **3.1.8 El biogás como producto principal**

El biogás obtenido mediante DA es una energía renovable que puede ser utilizada de diferentes formas. Este biogás contiene un porcentaje promedio de metano de 65 %, (Varnero Moreno, 2011). Este porcentaje de metano le confiere características energéticas importantes, de manera que es apto para diferentes usos. Uno de los usos más simples del biogás, es para la producción de calor; se utiliza también para generación de electricidad o y como combustible para vehículos (Lehtomäki, Huttunen, Lehtinen, & Rintala, 2008).

El biogás contiene principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, pero también contiene partículas y trazas de otros gases como H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Tauseef, et al., 2013) por lo que debe ser purificado en algunos casos. Dependiendo del uso que se le dé al biogás se establecen los requisitos de purificación o acondicionamiento necesarios. Por ejemplo, cuando se usa en aplicaciones simples como en calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción del CO<sub>2</sub> del biogás no es necesaria, el CO<sub>2</sub> simplemente pasa a

través del quemador o motor. Para aplicaciones más complejas del biogás, como en vehículos, que requieren combustibles de mayor densidad, el CO<sub>2</sub> y otros gases contaminantes deben ser removidos (Varnero Moreno, 2011).

### **3.1.9 Otros productos de valor**

Además del biogás rico en metano, la DA genera otros productos de gran importancia. Por un lado, la DA permite obtener hidrógeno (otro tipo de combustible) y productos valiosos como disolventes y ácidos. La MO digerida es otro de los productos de la DA, que puede ser usada como abono orgánico o acondicionador del suelos ya que contiene gran cantidad de nutrientes (Mata-Alvarez et al., 2014). Cabe aclarar, que el uso agrícola del material digerido debe ser evaluado para no causar inestabilidad en los suelos. Propiedades químicas como pH, salinidad, contenido de nutrientes y metales pesados deben ser tenidas en cuenta antes de la adición del material, de igual manera la carga de patógenos en el material debe ser evaluada y se recomienda contrastar el balance de nutrientes a aportar y los requeridos por el suelo.

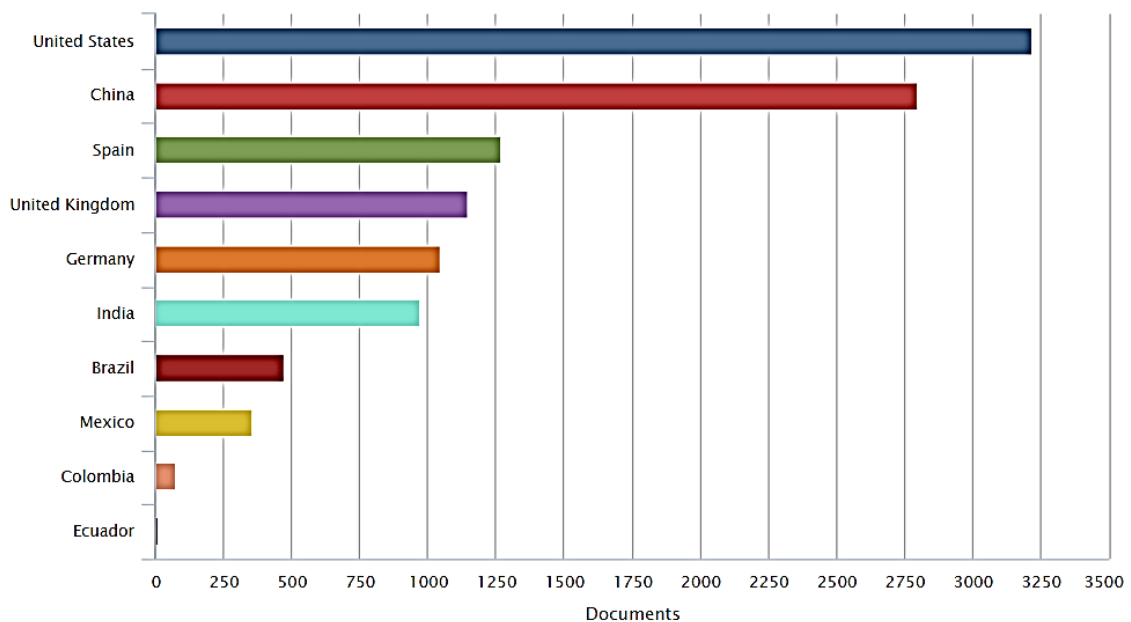
## **3.2 Estado del arte**

### **3.2.1 Principales sustratos y co-sustratos utilizados**

En los artículos publicados en los últimos años, los principales sustratos utilizados son, a saber, el estiércol animal (54 %), lodo de depuradora (22 %) y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (11 %). Por su parte, los co-sustratos más utilizados son los residuos industriales (41 %), residuos agrícolas (23 %) y residuos municipales (20 %) (Mata-Alvarez et al., 2014). De acuerdo con Mata-Alvarez et al. (2014), en el sector rural la DA de estiércol animal se ha establecido como una importante fuente de energía renovable. El EB, que posee un importante potencial energético (Ribeiro Salomon & Silva Lora, 2009), junto con el de cerdo son los más utilizados. El proceso de DA de estiércol libera biogás y convierte el residuo en MO estable, rica en nutrientes, con una carga de patógenos reducida (Ileleji et al., 2015) y libre de malos olores (Agyeman & Tao, 2014).

### 3.2.2 Avances en la investigación de DA

La DA es, ampliamente utilizada a nivel mundial (Zarkadas et al., 2015). En países desarrollados como Estados Unidos, China, Alemania, y otros, se ha implementado significativamente esta tecnología. Por el contrario, en países subdesarrollados el avance en la implementación de esta tecnología es escaso. Prueba de ello es la gran diferencia en el número de publicaciones científicas entre países desarrollados y subdesarrollados sobre el tema (figura 3-2).



**Figura 3-2.** Publicaciones en el tema de DA en diferentes países desde 1944 a 2015

Fuente: (Scopus - Analyze search results, 2015)

Sin embargo, es importante destacar, que si bien las publicaciones por parte de algunos países son escasas en comparación con los países desarrollados, esto no significa que no haya estudios sobre el tema. Es importante destacar, por ejemplo, los esfuerzos que se realizan en América Latina para fomentar la investigación y aplicación de la tecnología de DA, una buena prueba de ello es la creación de la Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe (RedBioLac) cuyo objetivo, entre otros, es intercambiar información y experiencias entre las instituciones participantes en la Red, identificar y superar barreras técnicas, ambientales, sociales y económicas que enfrenta la tecnología.

También es importante destacar que un gran número de programas de implementación de la tecnología de DA a pequeña escala se han desarrollado en diferentes países como Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Paraguay y Perú, con implementación de diferentes tipos de digestores como digestores de cúpula fija, digestores de tambor flotante y digestores tubulares, con la utilización de diversos sustratos (Garfí, Martí-Herrero, Garwood, & Ferrer, 2016).

A nivel de Colombia, también es importante destacar la creación de la Red Colombiana de Energía de la Biomasa (RedBioCol), que busca contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad colombiana mediante la promoción del aprovechamiento energético de residuos orgánicos con acciones de articulación, gestión del conocimiento e incidencia socio política y ambiental en los territorios. Además, es importante reconocer que diferentes universidades colombianas se dedican a desarrollar proyectos de investigación en el tema de DA como son la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Valle, la Universidad de Cartagena, la Universidad de Antioquia, la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad Industrial de Santander, entre otras.

### **3.2.3 Digestión anaerobia de estiércol bovino**

La ganadería es una actividad que se desarrolla en muchos países. Esta actividad genera una cantidad de estiércol, superior a la requerida como fertilizante, ocasionando impactos ambientales (Mao et al., 2015) como emisión de GEI, olores ofensivos, entre otros. Este residuo ha sido utilizado como materia prima para la generación de biogás mediante DA; sin embargo, este material presenta un alto contenido de nitrógeno que causa un desequilibrio de nutrientes que se traduce en inhibición por amoníaco. Además, el alto contenido de fibras también ocasiona bajos rendimientos de metano; sin embargo, este material es considerado un excelente sustrato pues el alto contenido de humedad y la variedad de nutrientes que presenta se requiere para el crecimiento óptimo de población microbiana (Marañón et al., 2012), además de su alta capacidad de amortiguación (Dias, Fragoso, & Duarte, 2014). Como estrategia para contrarrestar el desequilibrio de nutrientes del EB se ha trabajado en co-digestión con otros residuos orgánicos (tabla 3-1) que ayuden a equilibrar la relación C/N y favorecer el proceso de DA.



**Tabla 3-1.** Reportes de DA de EB con algunos co-sustratos.

Co-sustrato	Mezcla	Carga orgánica	T °C	TRH (días)	Tipo de reactor	Biogás	Metano
<sup>1</sup> Residuos de paja	1:9, 3:7, 5:5, 7:3 y 9:1	3.2 g/L cada dos días. 8.0% de ST	35	40	Semi-continuo	220-525 ml/d	-
<sup>1</sup> Estiércol de cerdo	-	8.0% de ST	35±2	35	Por lotes	15,447.5 ml (acumulativo)	-
<sup>1</sup> Residuos de frutas y verduras	50:50 (peso húmedo)	5.01 kg SV/m <sup>3</sup> /d	35	21	CSTR	-	0.45 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> SV
<sup>1</sup> Aguas residuales de destilerías	81:19 (base húmeda)	-	37	-	<i>Batch</i>	0.12 m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> SV (biogás)	-
<sup>2</sup> Residuos de molienda de aceituna	3:1 (base húmeda)	5.50 kgm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> (COD)	37	-	<sup>a</sup> CSTR	-	0.18 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> SV
	3:1 (base húmeda)	5.50 kgm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> (COD)	55	-	CSTR	-	0.21 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> SV
<sup>2</sup> Glicerol	94:6 (ST)	5.41 kgm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> (COD)	55	-	CSTR	-	0.6 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> SV
<sup>2</sup> Suero de la producción de queso	50:50 (base húmeda)	1.7 kgm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> (COD)	35	-	CSTR – 2 etapas	-	0.26 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> SV
<sup>2</sup> Subproductos de remolacha azucarera	50:50 (base húmeda)	5.00 kgm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> (SV)	55	-	CSTR	-	0.24 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> SV

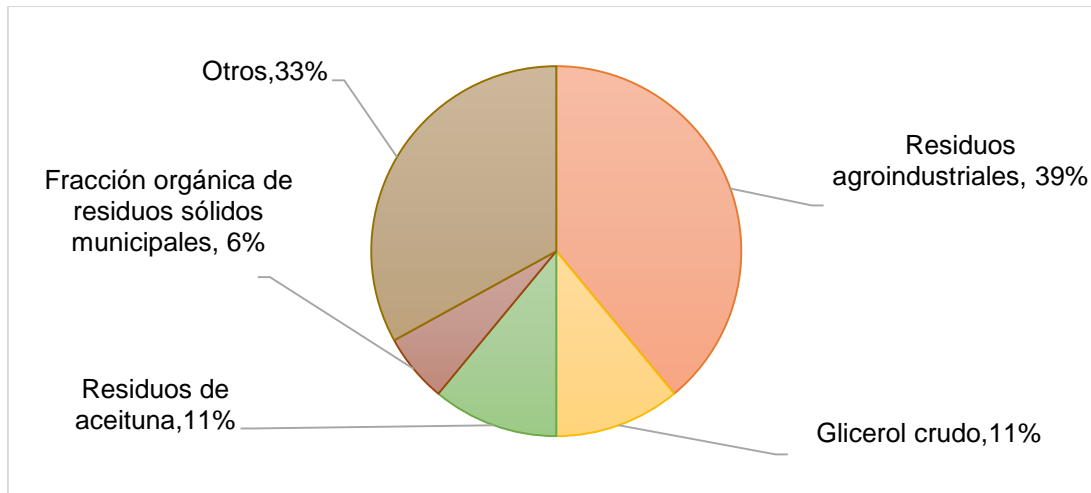
<sup>a</sup> Reactores de agitación continua

**Fuente:** (<sup>1</sup>Mao et al., (2015); <sup>2</sup>Mata-Alvarez et al. 2014)

Entre los co-sustratos más utilizados en co-digestión con EB se encuentran residuos agroindustriales (39%), glicerol crudo (11%), residuos de molienda de aceituna (11%), y fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) (6%), además de otros co-sustratos que se han evaluado (33%) (Mao et al., 2015) (figura 3-3).

El EB se ha empleado como sustrato en diversos proyectos de investigación y de implementación de la tecnología de DA (Dias et al., 2014). Uno de los casos donde se ha usado como sustrato es en la implementación de biodigestores de bajo costo en países en desarrollo, entre ellos algunos latinoamericanos como Colombia, Perú, Bolivia, Ecuador, y Argentina; en estos países la tecnología de biodigestores de bajo costo ha sido adaptada

a diferentes condiciones climáticas (J Martí-Herrero & Cipriano, 2012) logrando obtener resultados positivos de implementación incluso en climas fríos (Perrigault, Weatherford, Martí-Herrero, & Poggio, 2012).

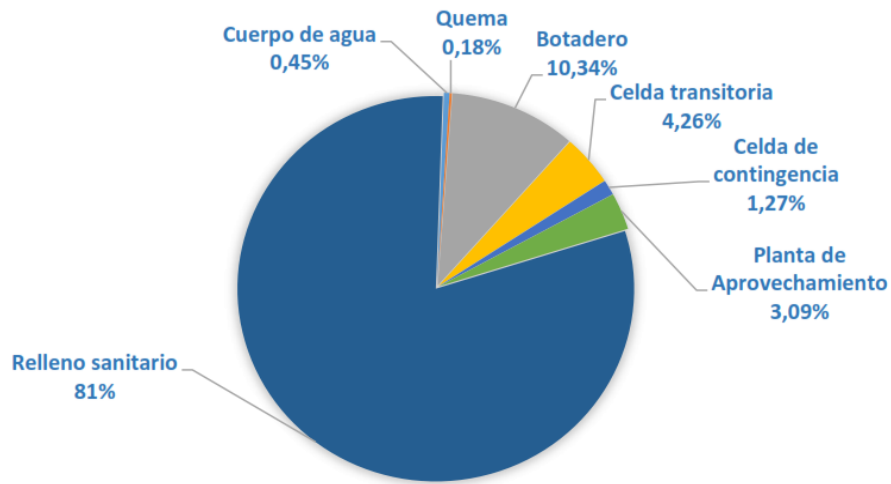


**Figura 3-3.** Principales co-sustratos utilizados en DA de EB

Fuente: Modificado de (Mao et al., 2015)

### 3.2.4 Manejo de los residuos sólidos orgánicos en el departamento de Nariño

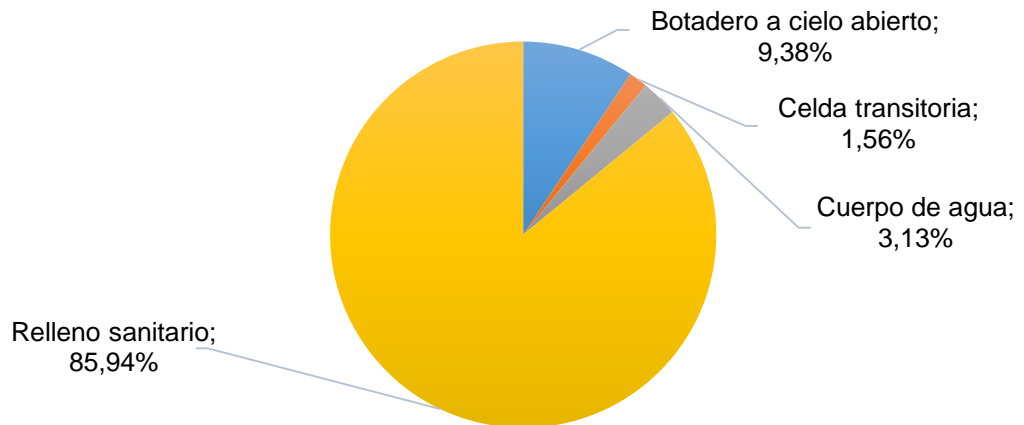
En Colombia, solo un pequeño porcentaje de residuos sólidos orgánicos es aprovechado, la mayoría aún son dispuestos de manera no autorizada. De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2014), el 81.4% de los municipios (897) realiza una disposición autorizada (relleno sanitario, planta integral y celda de contingencia) de estos residuos; el restante 18.6% de los municipios dispone los residuos de manera no autorizada (celda transitoria, botadero, enterramiento, vertimiento a cuerpos de agua, quema de los residuos sólidos y todo aquel que no cumpla con las definiciones y autorizaciones establecidas y requeridas por las normas y autoridades competentes). Los tipos de sistemas de disposición final se reflejan en la Figura 3-4. Cabe destacar que en las plantas integrales solamente se maneja el 1.1% del total de los residuos que ingresan.



**Figura 3-4.** Distribución de municipios por tipo de sistema de disposición final en Colombia

Fuente: (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios 2015)

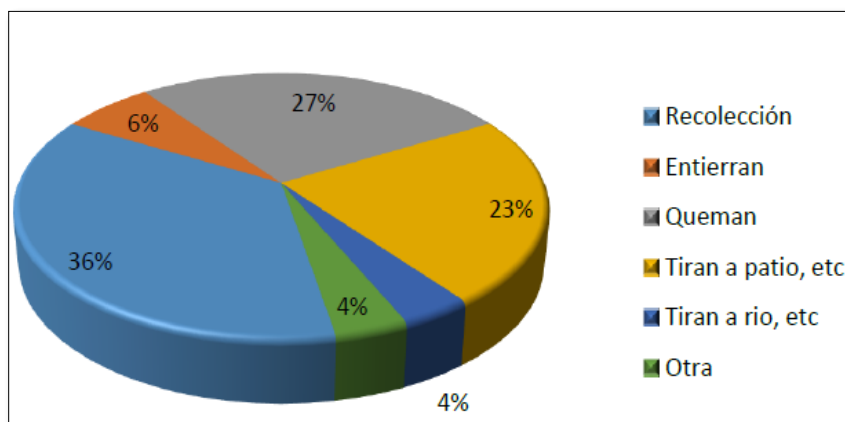
Por su parte, en Nariño la generación de residuos sólidos es, en promedio de 401.5 Ton/día (189.812 Ton/año), de las cuales tan solo se aprovecha el 2.9%; de los residuos no aprovechados, el 60.09% es dispuesto adecuadamente y el 37.0% se dispone inadecuadamente (Gobernación de Nariño, 2012). La disposición de los residuos sólidos por municipios se da así: el 85.94% disponen en rellenos sanitarios, el 1.56% en celda transitoria, el 9.38% en botadero a cielo abierto y el 1.56% en cuerpos de agua (figura 3-5) (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015).



**Figura 3-5.** Municipios por sitio donde se realiza la disposición final de residuos sólidos en Nariño

Fuente: (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015)

El panorama de la disposición de los residuos es aún más preocupante en la zona rural del departamento, donde un gran porcentaje es dispuesto de manera inadecuada (figura 3-6).



**Figura 3-6.** Tratamiento de residuos en zona rural de departamento de Nariño

Fuente: (PERS-Nariño, 2014)

### 3.3 Normatividad asociada

Dada la estrecha relación existente entre el desarrollo de las energías renovables a partir de fuentes primarias y la protección ambiental, en Colombia se han expedido leyes que impulsan el desarrollo y uso de energías provenientes de fuentes renovables, en el marco del uso racional y eficiente de la energía y la defensa del ambiente (Ley 1665 de 2013).

Entre la normatividad que se ha expedido se encuentra:

Decreto - Ley 2811 de 1974: el numeral 6 del artículo 3, señala entre los recursos naturales renovables, las fuentes primarias de energía no agotables, que de conformidad con lo establecido en el artículo 167 corresponde a la proveniente de la energía solar, eólica, la contenida en el mar y recursos geotérmicos.

Ley 99 de 1993: en primera instancia, el numeral, 1 del artículo 1, señala que el proceso de desarrollo económico y social del país se orientará según los principios universales y del desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo, entre los cuales vale la pena resaltar, por su incidencia

frente a la búsqueda del desarrollo sostenible y la protección del ambiente, los principios 1, 4, 8 y 9. Igualmente, el artículo 3 señala que debe entenderse por desarrollo sostenible, aquel que conduzca al crecimiento económico, la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales en que se sustenta, ni deteriorar el ambiente, de tal suerte que las futuras generaciones puedan utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades. Finalmente, el numeral 33 del artículo 5 señala entre las funciones del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial promover la sustitución de recursos naturales no renovables, para el desarrollo de tecnologías de generación de energías no contaminantes ni degradantes.

Ley 164 de 1995: el artículo 12, hace referencia a los proyectos de reducción u absorción de los gases efecto de invernadero en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Ley 697 de 2001: en su artículo 1, señala el interés nacional por promover el uso de energías no convencionales (energía solar, eólica, geotérmica, biomasa y los pequeños aprovechamientos hidroenergéticos) de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

Ley 1083 de 2006: reseña la relación entre los combustibles limpios, la salud y el medio ambiente.

Ley 1665 de 2013: Por medio de la cual se aprueba el "Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009.

Ley 1715 de 2014: por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

Además de la normatividad asociada al tema de energías renovables, la normatividad establecida en el tema de vertimientos, calidad del aire, productos agropecuarios ecológicos y productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes también se relaciona con el proyecto de investigación propuesto, como son:

Resolución 631 de 2015: "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público".

Resolución 0610 de 2010: “por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia”.

Resolución 187 de 2006: “por la cual se adopta el reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaçado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y comercialización de Productos Agropecuarios Ecológicos” (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural).

Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 de 2004: La cual establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo.

## 4. Materiales y métodos

El proyecto de investigación se realizó en cuatro etapas (figura 4-7).

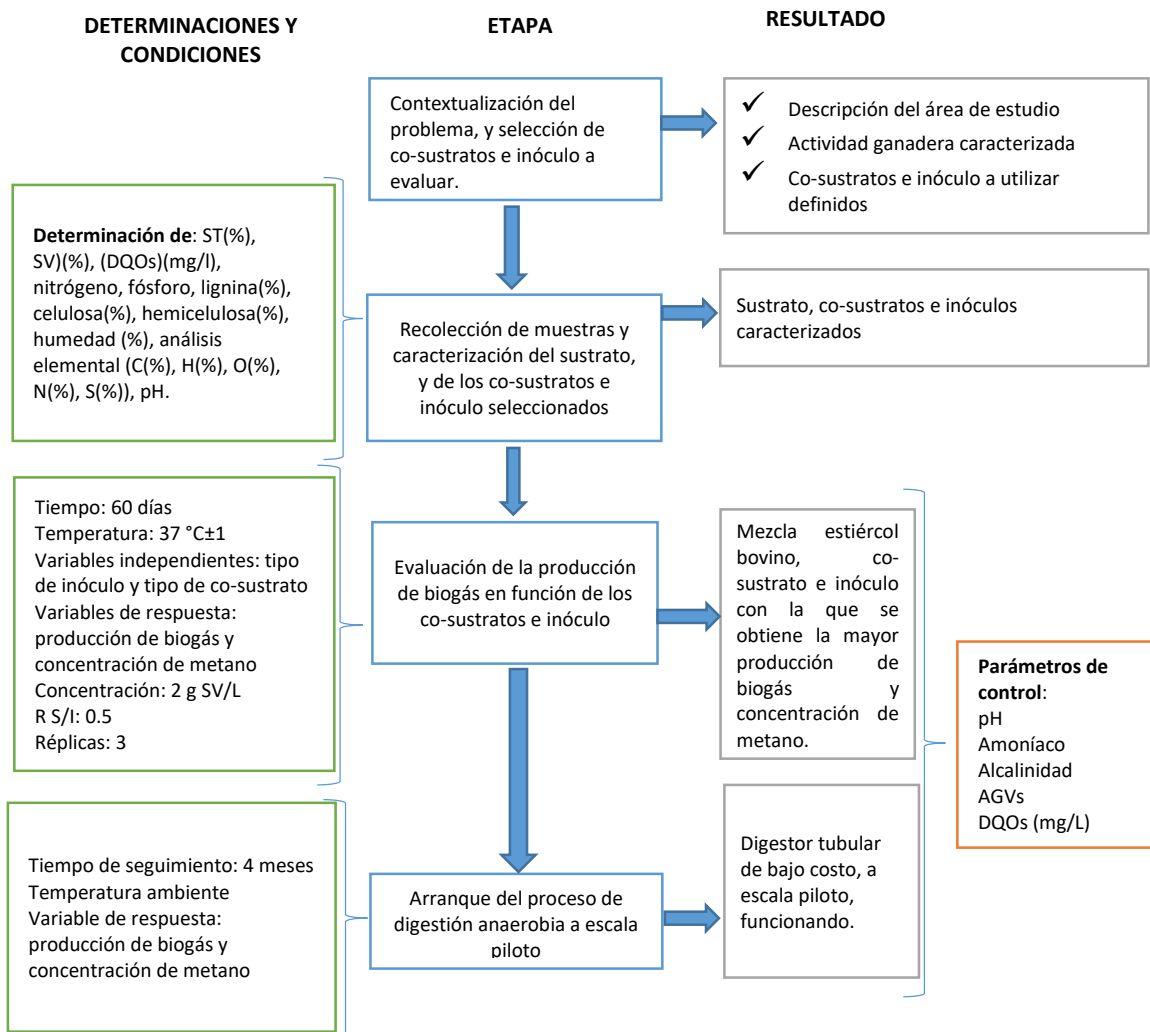


Figura 4-7. Esquema metodológico de la investigación

## **4.1 Contextualización del problema, y selección de co-sustratos e inóculo a evaluar.**

La recolección de información preliminar se llevó a cabo mediante la revisión de bases de datos, consulta de consolidados agropecuarios de la Unidad Municipal de Asistencia Técnica (UMATA), la alcaldía municipal de Cumbal y también de la gobernación de Nariño. Además, se realizaron encuestas a los directores de asociaciones ganaderas del municipio para conocer el interés de la comunidad frente al proyecto, el manejo de la actividad ganadera y la generación de residuos orgánicos que pudieran ser utilizados como co-sustratos en el proceso de DA del EB. Después de efectuar dicha revisión y de aplicar las encuestas mencionadas, se realizó la descripción del área de estudio, la caracterización de la actividad ganadera y se definió los co-sustratos e inóculo a utilizar.

La selección de co-sustratos e inóculo a utilizar se realizó teniendo en cuenta disponibilidad en el municipio en el caso de los co-sustratos y en el municipio o la región en el caso del inóculo. En el caso de los co-sustratos, inicialmente se consultó información en entidades públicas de influencia en la zona de estudio sobre actividades productivas que generen residuos orgánicos que pudieran ser aprovechados para realizar co-digestión con el EB y posteriormente gracias a la información proporcionada por los directores de las asociaciones lecheras se logró definir cuáles serían utilizados. En el caso del inóculo, se requería de un biodigestor que se encontrara en funcionamiento, que funcionara en su totalidad con EB o que éste fuera el principal material de alimentación y que estuviera instalado en una zona con características similares o cercanas a las del área de estudio.

## **4.2 Recolección de muestras y caracterización del sustrato, co-sustratos e inóculo seleccionados**

Las muestras de sustrato y co-sustratos para caracterizar y posteriormente utilizar en la investigación, se tomaron de una finca representativa de la actividad ganadera en el municipio. Esta finca se seleccionó teniendo en cuenta: 1) que generara el sustrato a evaluar; 2) que generara también otros co-sustratos; 3) que estuviera ubicada en una zona representativa de las condiciones climáticas y de actividad antrópica del municipio; y 4) que los propietarios tuvieran la disposición para permitir la recolección de las muestras y demás actividades necesarias dentro de la investigación. La toma de muestras,



almacenamiento y análisis se realizaron teniendo en cuenta las metodologías de los métodos estándar (APHA, 1992).

Después de tomar las respectivas muestras de sustrato, co-sustratos e inóculos seleccionados, de manera que sean representativas para la investigación, estas fueron caracterizadas, al igual que el inóculo, para determinar características relevantes para el proceso de DA, de acuerdo con lo recomendado por Angelidaki et al. (2009). Se realizaron análisis de: pH, Sólidos Totales (ST) (%), Sólidos Volátiles (SV) (%), Demanda Química de Oxígeno soluble (DQOs)(mg/L), nitrógeno, fósforo, lignina (%), celulosa (%), hemicelulosa (%), humedad (%), y análisis elemental (C (%), H (%), O (%), N (%), S (%)).

### **4.3 Evaluación de la producción de biogás en función de nutrientes, co-sustratos e inóculo**

La evaluación de la producción de biogás en función de nutrientes, co-sustratos e inóculos seleccionados, se realizó a través de dos pruebas:

**Prueba 1:** potencial de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes. Esta prueba se realizó con el objetivo de evaluar el comportamiento de los co-sustratos como sustratos individuales e identificar sus ventajas y limitaciones en un proceso de DA.

**Prueba 2:** efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del EB. En cuanto al efecto de la inoculación, el objetivo fue evaluar tratamientos que permitieran observar la diferencia en el comportamiento del estiércol bovino con y sin la presencia de un inóculo adicional, esto debido a que el EB contiene microorganismos anaerobios, y puede actuar como sustrato e inóculo al mismo tiempo (Marañón et al., 2012). Y con respecto a la adición de co-sustratos, lo que se buscó fue evaluar mezclas que se pudieran aplicar en sistemas reales en el área de estudio.

Las dos pruebas se realizaron mediante el ensayo del PBM, por lotes, teniendo en cuenta los procedimientos recomendados por Owen et al. (1979) y Angelidaki et al. (2009). Como unidades experimentales se usaron frascos de vidrio de 250 ml con un volumen efectivo de 200 ml, sellados herméticamente y con válvulas instaladas en la parte superior que permitían el paso del biogás. Las pruebas se realizaron utilizando R S/I de 0.5 en términos de SV, y una concentración de sustrato de 2 g SV / L. La R S/I fue seleccionada teniendo en cuenta las recomendaciones de Angelidaki et al. (2009) de que la concentración de

inóculo debe ser siempre alta en comparación con la del sustrato (en términos de SV), de manera que sea suficiente para evitar la acidificación, también se tuvieron en cuenta investigaciones previas (no publicadas) en las cuales una R S/l de 0.5 permitió procesos estables. Además para efectos de comparación de resultados, en la evaluación de PBM para diferentes sustratos las R S/l comúnmente utilizadas son 0.25, 0.5, 1 y 2 (Alexis et al., 2015; Elbeshbishy, Nakhla, & Hafez, 2012; Pellerá & Gidaracos, 2016; Raposo, Banks, Siegert, Heaven, & Borja, 2006). Las pruebas se realizaron dentro del rango de temperatura mesofílico a  $37\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1$ . Cada tratamiento se realizó por triplicado con su respectiva botella de control. Las unidades experimentales fueron sometidas a agitación manual dos veces por día durante todo el tiempo del experimento. La producción de biogás se midió diariamente usando la técnica de desplazamiento de líquido (figura 4-8), y periódicamente se tomaron muestras para determinar la concentración de metano por cromatografía de gases. El seguimiento se realizó durante un periodo de 60 días. Además, se tomaron muestras periódicamente para la determinación de los parámetros de control tales como pH, amoníaco, alcalinidad y AGVs, por su parte la DQOs (mg/L), se determinó al inicio y al final del proceso para su respectiva comparación.



**Figura 4-8.** Medición de biogás por la técnica de desplazamiento de agua.

Los datos de producción de biogás se manejaron a condiciones estándar de acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) que definen condiciones estándar a una temperatura de cero Celsius 0 °C y una atmosfera de presión.

### 4.3.1 Potencial de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes

Para determinar el potencial de biogás del Estiércol de Cuy (EC) y de las Aguas Residuales Lácteas (ARL) se evaluaron 4 tratamientos, donde la variable independiente fue nutrientes y la variable de respuesta fue producción de biogás (tabla 4-2). Los nutrientes utilizados fueron los recomendados por Angelidaki et al. (2009) con algunas modificaciones.

#### Sustratos

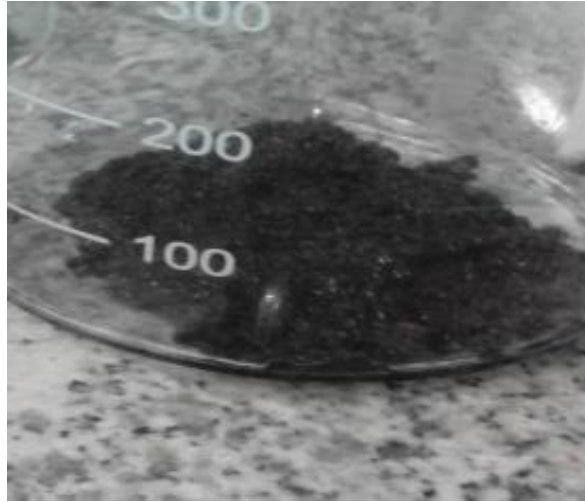
En esta prueba la producción de biogás de los co-sustratos EC y ARL se determinó individualmente. Las muestras fueron recolectadas según se requería, caracterizadas y congeladas hasta el inicio del experimento. El EC fue triturado a un tamaño aproximado de 4 a 6 mm.

**Tabla 4-2.** Tratamientos para evaluar el potencial de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes

	Sustratos		Variable de respuesta
Variable independiente	EC	ARL	Producción de biogás
Con Nutrientes (CN)	Tratamiento 1 (EC-CN)	Tratamiento 3 (ARL-CN)	
Sin Nutrientes (SN)	Tratamiento 2 (EC-SN)	Tratamiento 4 (ARL-SN)	

#### Inóculo

El inóculo (figura 4-9) utilizado en este experimento, fue un lodo granular proveniente de un digestor anaerobio alimentado con vinazas originadas en un ingenio azucarero. El lodo granular fue almacenado a 4 °C hasta el inicio del experimento. ST y SV del inóculo fueron 7.8% y 93.57%, respectivamente.



**Figura 4-9.** Lodo granular

### Reactores y operación

Para los tratamientos con EC, el inóculo se mezcló con el sustrato, se dispuso en cada uno de los frascos (figura 4-10) y se completó el volumen efectivo con agua destilada garantizando una concentración de sustrato de 2 g SV/L.



**Figura 4-10.** Montaje de los reactores con EC

En los tratamientos con ARL la concentración de SV a evaluar fue de 1.09 g SV/L correspondiente a la concentración de SV del ARL (figura 4-11).



**Figura 4-11.** Montaje de los reactores con ARL

### 4.3.2 Efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del estiércol bovino

#### Sustratos y co-sustratos

EB se utilizó como sustrato principal y EC y ARL como co-sustratos. EB y EC se obtuvieron de la finca seleccionada como caso de estudio en el municipio de Cumbal, cuya principal actividad es la cría de ganado lechero y cuyes. Por otro lado, el ARL se recogió en una instalación de almacenamiento de leche que pertenece a una asociación de la comunidad en la misma localidad. Se tomaron muestras según se requería, se caracterizaron y se mantuvieron a  $-4^{\circ}\text{C}$  hasta el inicio del experimento. El EC se trituró aproximadamente 4 mm a 6 mm al igual que en la prueba 1.

#### Inóculo

El inóculo utilizado fue un lodo de un digestor anaerobio alimentado con EB, operando a temperatura ambiente ( $13^{\circ}\text{C}$  de media) en el municipio de Pasto (Nariño, Colombia). Los lodos fueron aclimatados a la temperatura ambiente ( $23^{\circ}\text{C}$ ) del sitio donde se desarrollaron las pruebas a escala de laboratorio y adaptados al sustrato y co-sustratos, alimentando 1 g/L hasta observar la generación de biogás antes del experimento. ST y SV del inóculo fueron 9.5% y 62.2%, respectivamente.

#### 4.3.2.1 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con dos factores, inóculo y co-sustrato. El inóculo tenía dos niveles: sin inóculo y con inóculo; y el co-sustrato tenía cuatro niveles: sin co-sustrato, co-sustrato EC, co-sustrato ARL, y co-sustrato EC + ARL, para un total de 8 tratamientos (tabla 4-3). En los tratamientos 2, 4, 6 y 8, se utilizó una relación 7:3

(EB: EC) en términos de SV, esta relación se definió teniendo en cuenta la cantidad promedio de EB recuperable y de EC generado en las fincas. En los tratamientos 1, 2, 5 y 6 el volumen efectivo se completó con agua destilada. En los tratamientos 3, 4, 7 y 8 el volumen efectivo se completó con ARL, teniendo en cuenta los SV proporcionados por el ARL para mantener la concentración de 2 g SV / l.

**Tabla 4-3.** Diseño experimental para la evaluación de la producción de biogás en función de co-sustratos e inóculo

		Factor B			
		Sin co-sustrato	Co-sustrato 1: EC	Co-sustrato 2: ARL	Co-sustrato 3: EC+ARL
Factor A	Sin inóculo	Tratamiento 1 (EB)	Tratamiento 2 (EB+EC)	Tratamiento 3 (EB+ARL)	Tratamiento 4 (EB+EC+ARL)
	Con inóculo	Tratamiento 5 (EB+I*)	Tratamiento 6 (EB+EC+I)	Tratamiento 7 (EB+ARL+I)	Tratamiento 8 (EB+EC+ARL+I)

\*Inóculo

### 4.3.3 Análisis estadístico

Para probar la hipótesis de igualdad de medias de los tratamientos, se empleó la prueba de análisis de varianza (ANOVA), y una prueba post-anova para jerarquizar los tratamientos al encontrar diferencias significativas estadísticas (Vargas Franco, 2007). Las pruebas se trabajaron con un nivel de significancia de 0.05.

## 4.4 Arranque del proceso de digestión anaerobia a escala piloto.

En esta etapa, se evaluó el desempeño de un sistema a escala piloto y el potencial en función de cantidad y calidad del biogás. El inicio de esta etapa se dio luego de obtener los datos del inóculo y del co-sustrato con los que se lograron los mejores resultados en términos de producción de biogás y concentración de metano. El arranque del proceso de DA se realizó en dos biodigestores tubulares de bajo costo, denominados biodigestor 1 (B1) y biodigestor 2 (B2). Para el diseño e implementación de los biodigestores, se tomaron

como referencia las propuestas de diseño y construcción de biodigestores para climas fríos de Martí-Herrero (2008). Teniendo en cuenta la baja temperatura del municipio de Cumbal (10 °C en promedio), los biodigestores se construyeron buscando un incremento de la temperatura interna con respecto a la temperatura ambiente, para garantizar mejores condiciones al proceso de digestión anaerobia. Así, se instaló un aislante de poliestireno expandido (conocido en Colombia, como icopor) de 3 cm de grosor en B1 y un aislante de guadua en B2. En el caso del aislante de guadua se instaló además una cubierta de polisombra para proteger el plástico. El volumen efectivo de los dos biodigestores se calculó para manejar el total del EB recuperable en la finca de estudio. Además de los aislantes se construyó una cubierta con plástico tipo invernadero para proteger los biodigestores y lograr una temperatura, dentro de los biodigestores, por encima de la del ambiente.

El seguimiento a los reactores se realizó por un tiempo de 4 meses. El biogás producido se calculó con el tiempo de funcionamiento de la estufa diseñada para funcionar con 0.9 m<sup>3</sup> de biogás por hora. Con el uso del método volumétrico se hicieron comparaciones para determinar el porcentaje de metano en el biogás y periódicamente se tomaron muestras para analizar el biogás mediante cromatografía. Además, se tomaron muestras para el análisis de los parámetros de control (pH, amoníaco, alcalinidad, AGVs y DQOs). Para B1 la toma de muestras de biogás se realizó durante el tercer mes después del arranque del sistema, mientras que para B2 la toma de muestras durante el periodo de seguimiento no fue posible ya que la producción no era suficiente. Adicionalmente, al término de los 4 meses se tomaron muestras del material digerido para análisis físico-químico y microbiológico.

## 4.5 Métodos analíticos

Los análisis de caracterización de sustrato, co-sustratos e inóculo, así como los de los parámetros de control, se realizaron usando los métodos estándar (APHA, 1992). Con cada análisis, se siguió un método particular, así: AGVs (5560 C. Método de destilación), amoníaco (4500-NH<sub>3</sub> E. Método titulométrico), alcalinidad (2320B. Método de titulación), pH mediante un medidor de pH inmediatamente tomada la muestra, DQOs (5220 D. Reflujo cerrado, método colorimétrico), ST (2540 B. ST secados a 103-105 °C), SV (2540 E. Sólidos fijos y volátiles incinerados a 550 °C), Nitrógeno Total Kjeldalh (NTK) (4500-Norg.B.

Método macro-kjendahl). Celulosa, hemicelulosa y lignina, se determinó mediante la metodología Van Soest por medio de los procedimientos Fibra Detergente Neutra (FDN), Fibra Detergente Acida (FDA) y Lignina Detergente Acido (LDA). La cuantificación de metano por el método volumétrico se desarrolló teniendo en cuenta lo reportado por Torres & Perez (2010). El biogás se analizó en un cromatógrafo de gases SHIMADZU GC17A, Columna: DB-WAX (Agilent Scientific. 30m x 0.25mm x 0.25µm), Detector: FID a 280 °C, Inyector: split/splitless a 250 °C. Inyección split 1:10 y Fase Móvil: Helio AP a flujo de 1.0 ml/min. Los análisis físico-químicos y microbiológicos del material digerido se realizaron de acuerdo con lo establecido por la NTC 5167, los físico-químicos se realizaron en laboratorio con registro ICA y los microbiológicos en laboratorio en proceso de tramitación del registro de funcionamiento ante el ICA.



## **5. Resultados y discusión**

### **5.1 Contextualización del problema, y selección de co-sustratos e inóculo a evaluar**

#### **5.1.1 Descripción del área de estudio**

El municipio de Cumbal, está situado al Sur Occidente del Departamento de Nariño limitando con la Republica del Ecuador. El municipio cuenta con alturas que van desde los 1000 a > 4500 m s.n.m, la cabecera municipal está localizada a una altura promedio de 3.050 m s.n.m., con una temperatura promedio de 10 °C (Alcaldía de Cumbal, 2012).

Cumbal se caracteriza por que su población es mayoritariamente indígena y está ubicada en el área rural. De acuerdo con el Censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el 93% de la población de Cumbal se auto reconoce como indígena y el 7% restante corresponde a blancos y mestizos (DANE, 2010). De acuerdo con las proyecciones de población del DANE, para 2010 la población total era de 34186 habitantes de los cuales más del 70% habitaban la zona rural, es decir 26639 habitantes, y los restantes 7547 habitantes la zona urbana. Para sus habitantes la principal actividad económica es la ganadería lechera.

#### **Clima del municipio de Cumbal**

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015, del municipio de Cumbal, dadas las características geomorfológicas, meteorológicas y altitudinales presentes en el municipio de Cumbal, existen seis (6) Pisos Térmicos, así: piso térmico cálido, piso térmico templado, piso térmico frío, piso térmico muy frío, piso térmico páramo y piso térmico nival (Alcaldía Municipal de Cumbal Nariño, 2012) (tabla 5-4).

**Tabla 5-4.** Pisos térmicos presentes en el municipio de Cumbal

Pisos térmicos	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)	Altura media (m s.n.m.)	Precipitación (mm/año)	Temperatura (°C)
Piso térmico cálido	7.35	0.61	1000 – 1180	2400 – 4000	> 25
Piso térmico templado	243.93	20.31	1180 – 2000	2400 – 4000	18 – 25
Piso térmico frío	281.37	23.43	2000 – 3000	1000 – 2000	12 – 18
Piso térmico muy frío	392.01	32.64	3000 – 3600	800 – 1000	6 – 12
Piso térmico paramo	273.38	22.76	3600 – 4500	250 – 600	3 – 6
Piso térmico nival	2.96	0.25	> 4500	< 250	< 1.5

**Fuente:** (Alcaldía Municipal de Cumbal Nariño, 2012)

De acuerdo con la información presentada, el mayor porcentaje del área del municipio de Cumbal (32.64%) presenta una temperatura correspondiente al piso térmico muy frío. En esta área se localiza la mayor parte de la población de Cumbal, y por tanto, es donde se presenta la mayor intervención antrópica, representada principalmente por la actividad ganadera. Teniendo en cuenta esta información y la importancia de observar el comportamiento del arranque de un sistema de DA bajo las condiciones más comunes en el municipio, la etapa de arranque del proceso de digestión anaerobia a escala piloto se desarrolló dentro de esta área.

### 5.1.2 Caracterización de la actividad ganadera

El municipio de Cumbal es el municipio nariñense con el mayor número de cabezas de ganado bovino después de Pasto, con un total de 29.443 animales (tabla 5-5). La explotación de ganado bovino lechero es para el municipio una de las principales actividades productivas.

Para obtener información sobre la distribución y el manejo de la actividad ganadera y actividades agropecuarias adicionales se aplicaron encuestas a los presidentes de las asociaciones lecheras presentes en el municipio. Para lo cual, fue necesario obtener bases de datos sobre asociaciones lecheras existentes y así poder realizar la invitación a la socialización del proyecto de investigación y realización de una encuesta informativa. Las bases de datos se solicitaron a entidades como: Federación Colombiana de Ganaderos

(FEDEGAN) y UMATA, pero debido a que estas bases de datos difieren en el número de asociaciones y al no existir un consolidado oficial, las invitaciones fueron enviadas teniendo en cuenta la base de datos más completa que fue facilitada por la UMATA del municipio de Cumbal.

**Tabla 5-5.** Cantidad de ganado bovino por rangos de edad en el municipio de Cumbal

Menores de 12 meses		12-24 meses		24-36 meses		Mayores de 36 meses		Total
M*	H**	M	H	M	H	M	H	
2.413	4.438	1.108	3.673	368	1.799	72	15.572	29.443

\*Macho, \*\*Hembra

**Fuente:** Inventario de Producción Agropecuaria en el Departamento de Nariño (Gobernación de Nariño, 2014)

Cabe destacar que los productores de leche están organizados en asociaciones para la recolección y distribución del producto. Cada asociación cuenta con un tanque de frío donde todos los usuarios, diariamente, llevan la leche generada en sus fincas, para luego ser comercializada a un comprador externo.

El municipio de Cumbal tiene su principal fuente de ingresos de la explotación ganadera, la cual genera desechos orgánicos como el EB y los residuos de procesamiento de leche, los cuales se descomponen al aire libre emitiendo GEI que perjudican en forma considerable al ambiente, es por esto que existe la necesidad de buscar una solución a esta problemática.

#### 5.1.2.1 Resultados de las encuestas

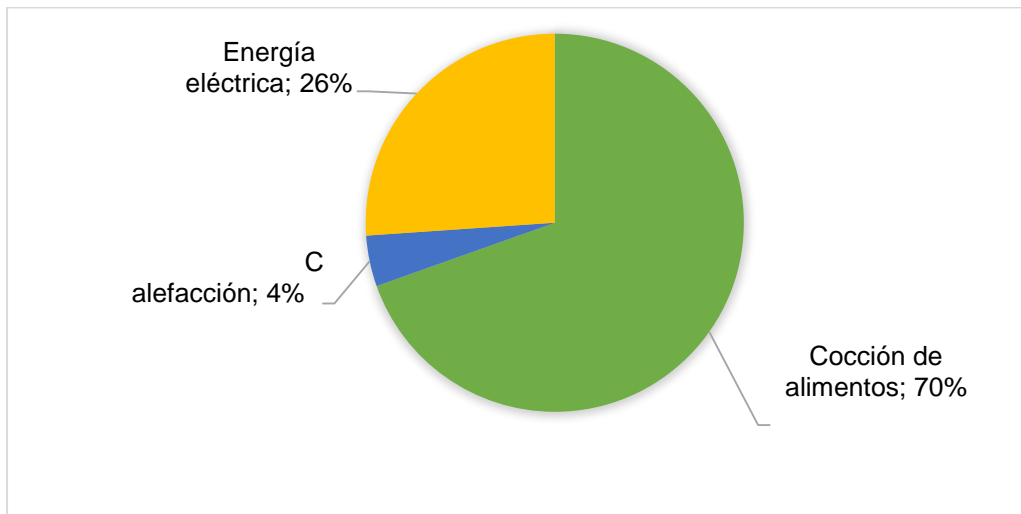
El 1 de Noviembre de 2015 se realizó la reunión con los presidentes de las asociaciones lecheras del Municipio de Cumbal, se dio a conocer los objetivos del proyecto Análisis de Oportunidades Energéticas en el Departamento de Nariño (ALTERNAR), los objetivos de la presente investigación y se aplicó la encuesta. A la reunión asistieron aproximadamente 27 personas y 20 presidentes de asociaciones respondieron a la encuesta.

Luego de hablarles de la tecnología de DA y de la implementación de biodigestores de bajo costo, la totalidad de los participantes manifestaron su interés, verbalmente y mediante la encuesta, en la implementación de un biodigestor en sus fincas.

Conociendo del interés de los participantes se aplicó la totalidad de la encuesta donde se obtuvieron los siguientes resultados:

### Posibles usos del biogás

El 70% de los directores las asociaciones consideran que el uso más apropiado para el biogás sería la cocción de alimentos, un 26% considera que el uso más apropiado sería para calefacción y un 4% para generación de energía eléctrica (figura 5-12). De acuerdo con estos resultados y teniendo en cuenta la discusión generada en la reunión se pudo inferir que los pobladores de Cumbal tienen el interés y expresan su necesidad de dar solución a los problemas ocasionados por el hecho de cocinar con leña como la deforestación y las afecciones a la salud por la exposición al humo.

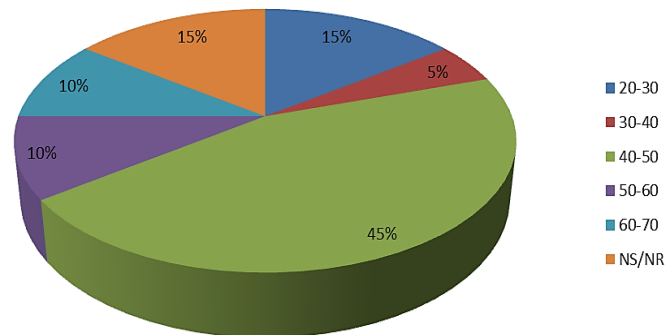


**Figura 5-12.** Uso al biogás propuesto por la comunidad

**Fuente:** Esta investigación.

### Familias por asociación

El 45% de las asociaciones está conformada por un número de 40 a 50 integrantes o familias, un 20% por más de 50 integrantes (figura 5-13).



**Figura 5-13.** Número de familias que conforman las asociaciones lecheras

**Fuente:** Esta investigación.

### Reses por familia y otros animales domésticos

En la Tabla 5-6 se presentan los datos del número de ganado bovino, porcino, cuyes y gallinas que tiene cada familia en las diferentes asociaciones. De acuerdo con los datos presentados en la tabla, obtenemos que en promedio cada familia o integrante tiene 6 reses. Esta información concuerda con lo observado en el municipio, pues la actividad ganadera se desarrolla en pequeñas fincas con un número reducido de animales. El hecho de que las fincas sean pequeñas facilita la recolección del estiércol si se piensa en un sistema de manejo y aprovechamiento del material mediante DA.

En cuanto a las otras especies de animales que tienen las familias, la más común es los cuyes pues el 73% de las familias tiene entre 10-60 animales, en promedio cada familia posee 30 animales; el 59% posee porcinos entre 1-5 animales; y el 45% posee entre 4-40 gallinas, además algunas familias también se dedican a criar conejos. Teniendo en cuenta esta información se contempla la posibilidad de usar el EC como co-sustrato en la DA de EB.

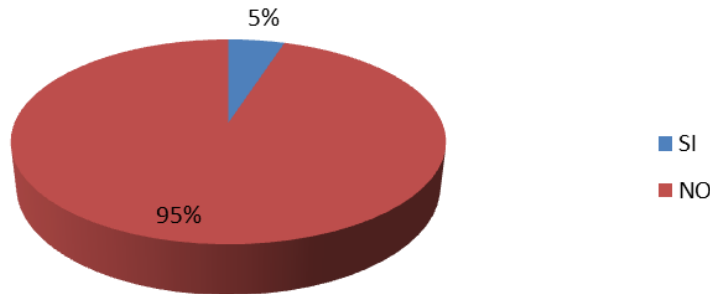
**Tabla 5-6.** Reses por familia y otros animales domésticos en las diferentes asociaciones

Nombre de la asociación	Reses (#)	Cerdos (#)	Cuyes(#)	Gallinas(#)
Asociación Integral Progreso en el campo	4	1	15	5
Asociación Indígena Guanguizan	5	X	X	X
Asociación Agroambiental Chirpued	4	X	60	X
Asociación Agro lechera Indígena el Prado	5	2	30	5
Asociación Lácteos Ambiental el Progreso	10	2	40	8
Asociación Lácteos Ambiental el Progreso Cuetial	10	2	40	8
Asociación Agropecuaria Cuenca del río Cuase	4	1	10	4
Asociación de Leche Campo Verde	4	X	X	X
Asociación Mundo Nuevo	5	2	20	X
Asociación Agropecuaria Ambiental Simarrones	5	1	25	X
Asociación El Nevado Guan Pangata	12	5	30	X
Asociación Agropecuaria Indígena Santa Marta	5	2	50	20
Asociación Guapul Tinajillas	4	2	25	7
Asociación Campo Verde	6	2	20	X
Asociación Arrayanes Chiles	3	X	15	6
Asociación Pradera Verde	10	X	X	X
Asociación Lácteos del Llano	4	2	30	X
Asociación Productora de Leche Nueva Esperanza	3	2	50	40
Usuario de asociación 1	15	X	20	10
Usuario de asociación 2	1	4	X	X

**Fuente:** Esta investigación

### Manejo de estabulado

De acuerdo con la encuesta aplicada, en el municipio es poco frecuente el uso de estabulado del ganado bovino. Solamente un 5% manejan algún tipo de estabulado (figura 5-14). Por lo que, para proponer un sistema de manejo y aprovechamiento del EB se debe proponer un sistema de recolección del material, teniendo en cuenta que solamente se podría recuperar el 20% del estiércol generado en cada finca.

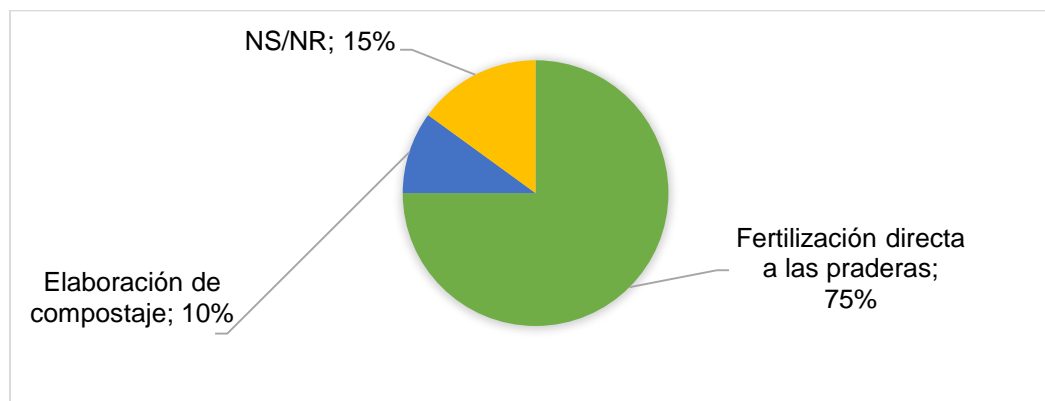


**Figura 5-14.** Familias que usan estabulado del ganado bovino

Fuente: Esta investigación.

### Manejo actual del estiércol bovino

En promedio, en cada finca se generan 138 kg de EB por día. El 75% de los integrantes de las asociaciones utilizan el EB para realizar fertilización directa a las praderas, el 15% realiza compostaje y el 10% no respondieron esta pregunta (figura 5-15).

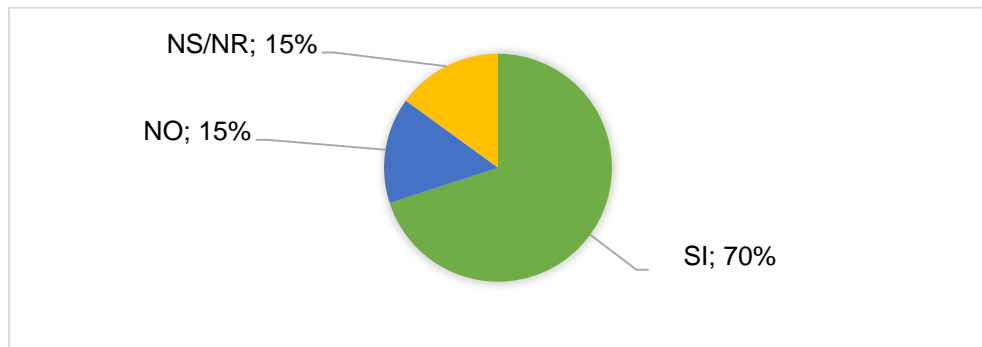


**Figura 5-15.** Manejo del estiércol bovino en las fincas

Fuente: Esta investigación.

### Dedicación a actividades agrícolas

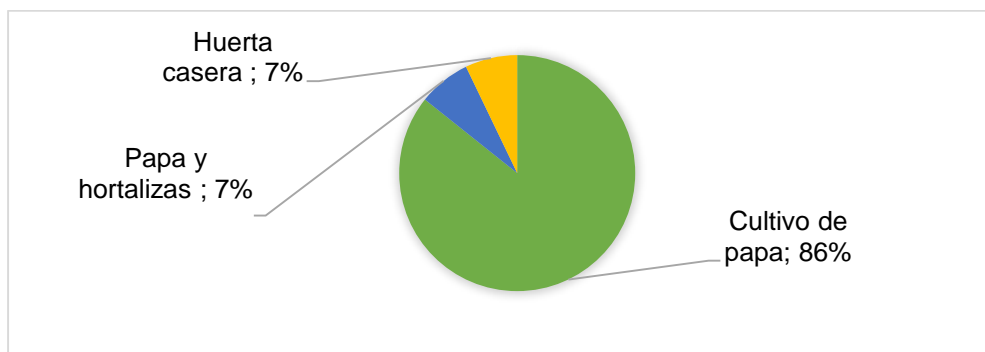
Los directores de las asociaciones manifestaron que el 70% de los integrantes se dedicaban a alguna actividad agrícola, el 15% sólo se dedican a la ganadería y el 15% no respondió a esta pregunta (figura 5-16).



**Figura 5-16.** Dedicación de las familias a alguna actividad agrícola

Fuente: Esta investigación.

De los usuarios que se dedican a alguna actividad agrícola, el 86% se dedican a cultivar papa, el 7% a la siembra de papa y hortalizas y el otro 7% tienen sus huertas caseras (figura 5-17). Esta actividad corresponde a pequeños cultivos,  $\frac{1}{2}$  de ha,  $\frac{1}{4}$  de ha, pequeños lotes en su gran mayoría.



**Figura 5-17.** Tipo de actividad agrícola desarrollada por las familias

Fuente: Esta investigación.



Así mismo, la totalidad de los participantes manifestaron que el material digerido sería utilizado como abono orgánico.

Teniendo en cuenta que la mayoría de participantes manifestaron que los residuos de los cultivos presentes en el municipio ya contaban con un uso, estos no se contemplaron para realizar co-digestión, pues la idea era evaluar residuos que no contaran con un aprovechamiento.

### 5.1.3 Co-sustratos e inóculo a utilizar

#### 5.1.3.1 Co-sustratos a utilizar

Inicialmente se consultó información sobre actividades productivas que generen residuos orgánicos que pudieran ser aprovechados para realizar co-digestión con el EB y posteriormente corroborar esta información con los directores de las asociaciones y algunos integrantes de estas a través de encuestas.

#### Análisis de producción agrícola en Cumbal

Se realizó una relación de cultivos que se producen en el municipio de Cumbal, estos datos se obtuvieron del consolidado agropecuario del año 2012 (tabla 5-7).

**Tabla 5-7.** Cultivos que se producen en el Municipio de Cumbal.

Producto	Área sembrada (ha)	Producción (t)	Productores (#)
Cebada	5.0	7.5	17
Coliflor	6.0	108	700
Haba	30	270	350
Lechuga	6	133.8	700
Maíz	20	19	230
Papa	300	4860	355
Repollo	7	175	700
Zanahoria	4	90	60
Frijol	20	22	46
Quinoa	4	7	12

**Fuente:**(Gobernación de Nariño, 2012)

La Tabla 5-7 indica el número de hectáreas sembradas por cultivo, así como también el total de productores, estos cultivos se siembran la mayoría de forma anual y algunos de forma semestral, por lo tanto es muy difícil obtener desechos para poder realizar co-digestión ya que no se contaría con la generación diaria de residuos.

### **Análisis de encuestas acerca de la producción agrícola en Cumbal**

Los resultados de la encuesta con relación a posibles co-sustratos provenientes del sector agrícola de Cumbal corroboraron la información presentada en el consolidado agropecuario de la gobernación, pues muchos de los productos presentados en la Tabla 5-7 son cultivados por los pobladores de Cumbal. Sin embargo, estos cultivos generan pequeñas cantidades de residuos de manera esporádica, y además ya los pobladores le dan un uso, de manera que no se pueden contemplar como opciones de co-sustrato.

Finalmente, los asistentes a la reunión expresaron la necesidad de dar opciones de manejo a algunos residuos que están actualmente causando impactos ambientales y que no son aprovechados. Uno de estos residuos es ARL, producto del lavado de las cantinas lecheras en las que los usuarios de las asociaciones llevan la leche diariamente hasta los tanques de frío. Ellos manifestaron su preocupación ya que esta agua residual estaba siendo liberada directamente a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento, causando contaminación, y además causando problema de malos olores en las instalaciones de los tanques de frío. El otro residuo sobre el cual manifestaron interés en tratar mediante DA fue el EC ya que este sería fácil de recolectar e ingresar al sistema, además que es la especie más común que poseen las familias.

Teniendo en cuenta la necesidad expresada por los directores de las asociaciones y el interés por los residuos ARL y EC, en la presente investigación se evaluó el potencial de estos como co-sustratos en la DA del EB.

#### **5.1.3.2 Inóculo a utilizar**

Teniendo en cuenta que en el municipio de Cumbal no se encontró un biodigestor que funcionara con EB, fue necesario buscar en otros municipios de la región. En el municipio de Cumbal se encontró solamente algunos biodigestores que funcionaban con estiércol de cerdo. Por lo tanto, el biodigestor seleccionado fue un biodigestor que funciona en las

instalaciones del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) del municipio de Pasto (Nariño, Colombia). Este reactor en el momento de la toma del inóculo se encontraba produciendo biogás, siendo alimentado solamente con EB y funcionando a temperatura ambiente (13°C de media).

## 5.2 Caracterización del sustrato y co-sustratos

Las muestras, de sustrato y co-sustratos, recolectadas en la finca seleccionada para el estudio fueron caracterizadas en los laboratorios de la Universidad de Nariño y de la Universidad del Valle (tabla 5-8) (anexos A, B y C).

**Tabla 5-8.** Caracterización de sustrato y co-sustratos

Parámetro	EB	EC	ARL
Humedad (%)	90.32	73.13	99.79
Cenizas (%)	19.43	17.77	-
C (%)	45.93	44.23	-
H (%)	5.59	5.23	-
O (%)	26.23	29.83	-
N (%)	2.78	2.9	-
S (%)	0.38	0.44	-
Celulosa (%)	15.12	24.4	-
Hemicelulosa (%)	24.91	15.2	-
Lignina (%)	12.34	12	-
Sólidos Totales (ST) (%)	9.68	26.87	0.205
Sólidos Volátiles (SV) (%)	80.57	82.2	0.109
Fósforo total (mg p-PO <sub>4</sub> /L)	0.50	0.31	11.36
Nitrógeno total NTK (mg N/L)	2.39	2.29	112
Carbono Orgánico total (mg Carbono/L)	-	-	595
DQO mgO <sub>2</sub> /L	-	-	4200
Relación C/N	16.52	15.25	-
pH	7.72	8.59	7.17

**Fuente:** Esta investigación

La relación C/N del sustrato principal EB y del co-sustrato EC obtenida fue de 16.5 y 15.25 respectivamente, relaciones apropiadas para un proceso de DA de acuerdo con lo reportado por Zhang et al. (2014). Esto significa que con estos residuos se puede obtener el equilibrio de nutrientes requerido por las bacterias anaerobias. con el aporte de nitrógeno suficiente para mantener la biomasa celular sin riesgo de inhibición por amoníaco, que se da cuando la relación es muy baja, que es tóxico para los metanógenos y causa insuficiente utilización de fuentes de carbono (Mao et al., 2015).

### 5.3 Producción de biogás en función de nutrientes, co-sustratos e inóculo

#### 5.3.1 Producción de biogás de co-sustratos y el efecto de la adición de nutrientes

La producción de biogás comenzó casi por igual para EC y ARL, pero después del día 3 aumentó muy rápido para EC mientras que para ARL se detuvo (figura 5-18). Este comportamiento en los tratamientos con ARL coincidió con una caída del pH y aún luego del ajuste de pH se presentó un periodo con una mínima producción hasta el día 18 del tratamiento.

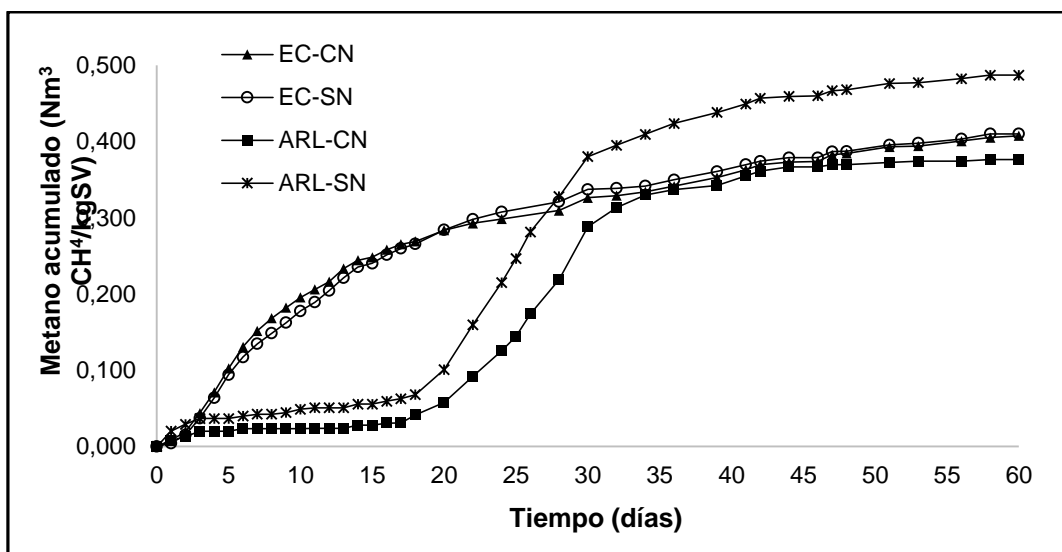


Figura 5-18. Efecto de los nutrientes en el potencial de metano del EC y ARL

Al final del experimento se obtuvo un máximo potencial de metano de 0.487 y 0.410 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV para ARL y EC, respectivamente (tabla 5-9). No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos CN o SN, así como entre los sustratos EC y ARL ( $p < 0.0001$ ). A partir de estos resultados, se dedujo que ambos co-sustratos presentan un rendimiento comparable y que la adición de nutrientes no tuvo efecto sobre la producción de metano. El hecho de que no se presentaran diferencias significativas con el uso o no de nutrientes permitió comprobar que una selección apropiada de co-sustrato permite operar procesos de DA sin nutrientes suplementarios, ofreciendo ventajas operacionales y económicas al proceso de DA (Fonoll, Astals, Dosta, & Mata-Alvarez, 2015). Este resultado coincide con lo reportado por Kafle & Chen. (2016), quienes compararon el potencial de metano de diferentes sustratos (estiércol de cerdo, vaca, cabra, caballo y pollo) y no encontraron diferencias significativas en el potencial de biogás CN y SN.

Sin embargo, aunque los tratamientos con EC no presentaron mayor potencial si presentaron mayor estabilidad y este residuo podría ser tratado de manera independiente; por el contrario, debido a los problemas de pH presentados en los tratamientos con ARL el tratar este residuo de manera independiente no sería recomendable.

**Tabla 5-9.** Potencial de metano de EC y ARL CN y SN

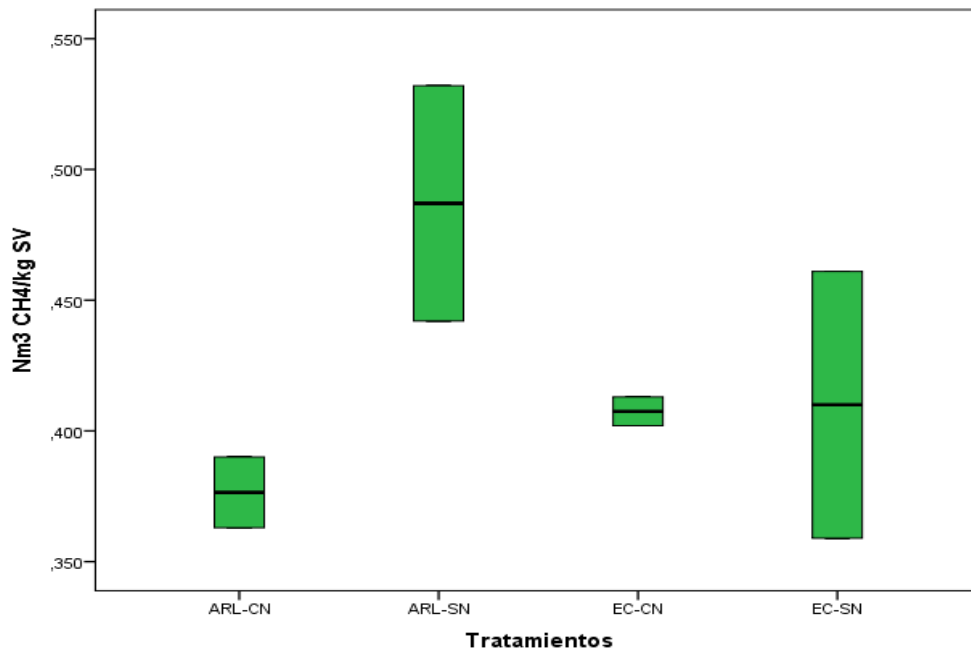
Tratamiento	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV	Desviación estándar
EC-CN	0.407	0.006
EC-SN	0.410	0.051
ARL-CN	0.376	0.014
ARL-SN	0.487	0.045

El potencial de metano obtenido tanto para el EC como para el ARL, son mayores a los reportados por Moset, Al-zohairi, & Møller. (2015), quienes reportan potenciales para diferentes sustratos, como celulosa, residuos de maíz, paja de trigo y EB, que se encuentran entre 0.206-0.329 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV.

El EC presentó una biodegradabilidad de 76.57 y 77.06 % para los tratamientos CN y SN, respectivamente, porcentaje que es superior a lo reportado por Panichnumsin et al. (2010),

quienes reportaron 65.00 y 67.00% para pulpa de yuca y estiércol de cerdo al usar la misma metodología de cálculo de este parámetro. Una posible razón para obtener una alta biodegradabilidad de EC en el presente estudio, es la reducción de tamaño del sustrato antes del experimento, lo cual facilita la solubilidad y por tanto mejora la biodegradabilidad (Gao, Liu, & Wang, 2016).

Para los dos sustratos, no se encontraron diferencias significativas con el uso o no de nutrientes. Sin embargo, para los dos sustratos, los tratamientos que contenían nutrientes presentaron un menor grado de dispersión de los datos con relación a los tratamientos donde no se usaron (figura 5-19). Siendo el tratamiento EC-CN el que presentó el menor grado de dispersión. Esto podría significar, que el uso de nutrientes generó mejores condiciones en el proceso de DA, pues permitieron obtener mayor homogeneidad en los datos de potencial de metano, sin embargo, el uso de nutrientes, especialmente en un proceso a escala real significaría desventajas operacionales y en términos de viabilidad económica (Kim J., Kim H., Baek, & Lee, 2016).



**Figura 5-19.** Diagrama de cajas y alambres para el potencial de metano de los co-sustratos EC y ARL CN y SN

En los reactores con ARL se observó un cambio físico en los días en los que se dio la producción de biogás (figura 5-20). El cambio consistió en que la mayor parte del lodo granular (inóculo) se ubicó en la superficie del líquido (figura 5-21-a), donde se había formado una capa grasosa en los primeros días del tratamiento (figura 5-21-b). Los gránulos descendieron hacia el fondo a medida que la capa fue disminuyendo y al final del experimento (día 60) todos los gránulos se ubicaron nuevamente en el fondo de los reactores, la capa fue eliminada completamente y los reactores tomaron una apariencia similar al blanco. Dicho cambio no se observó en los tratamientos con EC.



**Figura 5-20.** Reactores con ARL en los días con mayor producción de biogás, blanco en el extremo derecho.



(a)

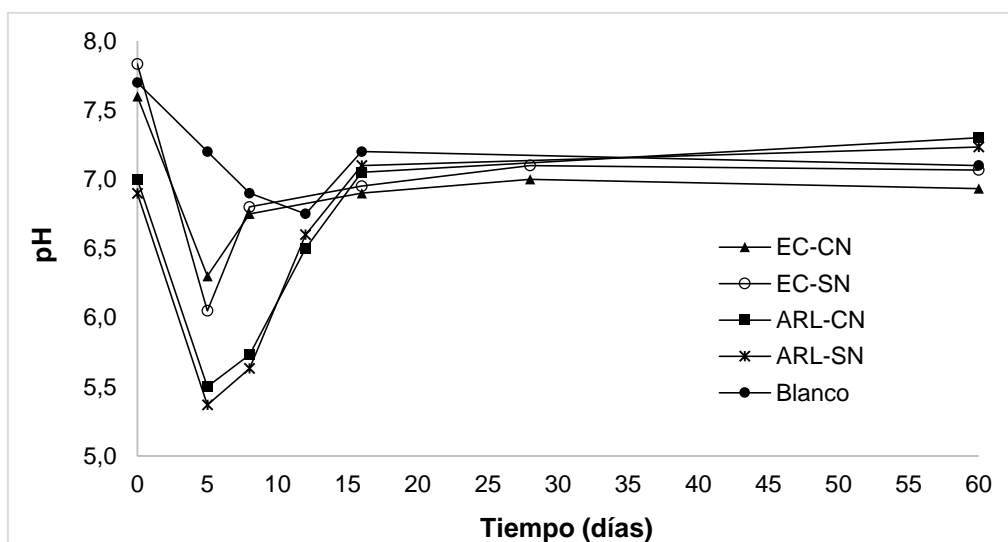
(b)

**Figura 5-21.** Inóculo ubicado en la parte superior (a) y capa grasosa en la superficie (b) en reactor con ARL

### 5.3.1.1 Comportamientos de los parámetros de control en la evaluación del potencial de metano de co- sustratos y el efecto de la adición de nutrientes

#### Comportamiento del pH

El comportamiento de pH para este experimento se muestra en la Figura 5-22. La disminución de este parámetro se observa en los primeros días, coincidiendo con el proceso de hidrólisis. A medida que avanzó el proceso, el pH tendió a estabilizarse hacia la neutralidad en los tratamientos con EC como es común en la DA, por el contrario en los tratamientos con ARL fue necesario ajustarlo para llevarlo a la neutralidad.



**Figura 5-22.** Comportamiento de pH en la DA de EC (a) y ARL (b), CN y SN

En el día 8, se observó que el pH para los tratamientos con EC aumentó hasta 6,8, mientras que en los tratamientos con ARL se mantuvo por debajo de 6,0; Por lo tanto, para ARL se ajustó el pH a la neutralidad. Sin embargo, a pesar del ajuste de pH, para los tratamientos con ARL la producción de metano no aumentó hasta el día 18 del experimento. A partir de ese punto en adelante la producción de metano se recuperó a niveles comparables a la de EC.

Una posible razón para que se presentara acidificación en los tratamientos con ARL es que los residuos de leche contienen carbohidratos fácilmente biodegradables, como la

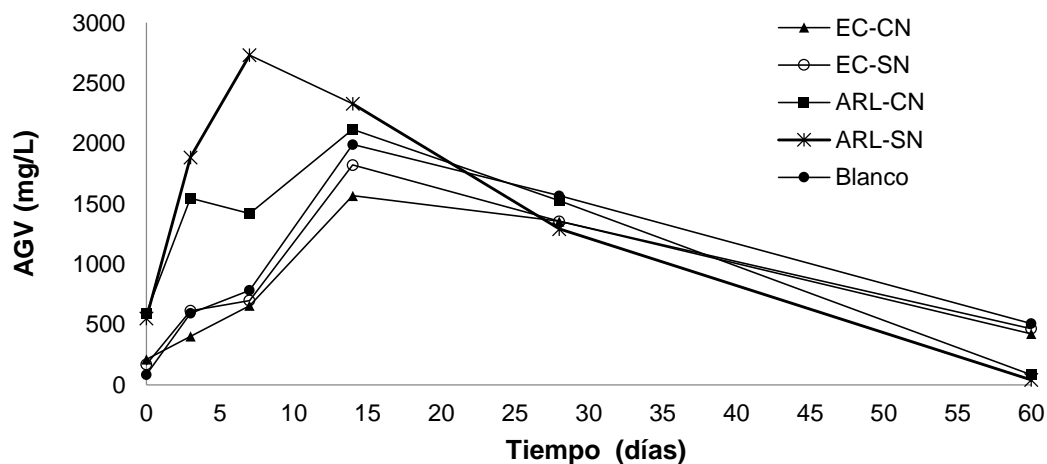


lactosa (Demirel, Yenigun, & Onay, 2005), que al encontrarse disueltos en el medio pueden contribuir a que la etapa de hidrólisis se acelere, de manera tal que la población de metanógenos no tenga la capacidad para consumir todos los productos intermedios, resultando en una acumulación de AGVs y por ende en acidificación (Dechrugsa, Kantachote, & Chaiprapat, 2013).

El pH afecta significativamente la tasa de crecimiento de los microorganismos capaces de transformar MO en biogás. Los valores de pH favorables para el proceso de DA están en el rango de 6.5 a 7.2 (Zhang et al., 2014). Los reactores con ARL presentaron problemas de acidificación, que pudo darse como consecuencia de la liberación de AGVs (Aboudi, Álvarez-Gallego, & Romero-García, 2016), por lo que el pH debió ser ajustado en el día 8. Por el contrario, los reactores con EB presentaron un comportamiento normal de pH, disminución en los primeros días (hidrólisis) y posterior estabilización sin necesidad de ajuste.

### Comportamiento de AGVs y alcalinidad

Los AGVs en todos los tratamientos aumentaron hasta el día 14, excepto para el tratamiento ARL-SN en el cual, el incremento solo se observó hasta el día 7, luego de estos días empezaron a disminuir gradualmente para todos los tratamientos hasta el final del experimento (figura 5-23). Cabe destacar que, el tratamiento ARL-SN, fue el que presentó la mayor producción de AGVs en los días iniciales del experimento.



**Figura 5-23.** Comportamiento de los AGVs en la DA de EC y ARL, CN y SN

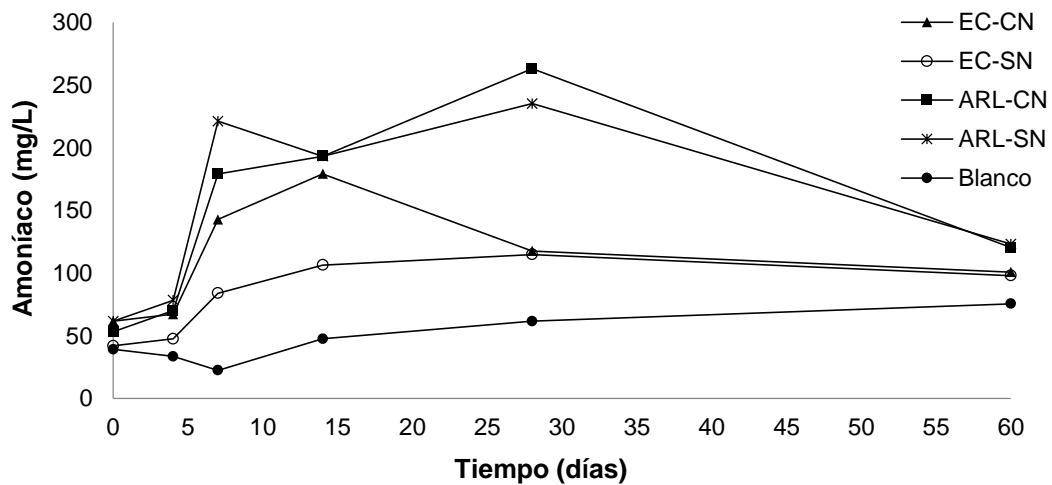
La relación entre AGVs y la alcalinidad (capacidad tampón) es considerado un criterio de estabilidad del proceso de DA (Browne, Allen, & Murphy, 2013; Raposo et al., 2009). Aunque la relación óptima de estos dos parámetros varía dependiendo de las condiciones del reactor, una relación AGV/alcalinidad por debajo de 0.4 se considera generalmente óptima, sin riesgo de acidificación para el proceso y una superior a 0.6 se considera como indicativo de sobrealimentación (Brown & Li, 2013). De acuerdo con Callaghan, Wase, Thayanithy, & Forster. (2002) valores menores a 0.4 representan un digestor estable, cuando se presentan valores entre 0.4-0.8 se puede presentar inestabilidad y con valores superiores a 0.8 se presentará una inestabilidad significativa.

La relación AGV/Alcalinidad, en todos los tratamientos evaluados, sobrepasó los valores recomendados para garantizar la estabilidad del proceso de DA. El tratamientos ARL-SN presentó el mayor incremento en esta relación hacia el día 3, para el día 7 y en adelante continuó descendiendo, pero aún en el día 28, al igual que todos los demás tratamientos, el valor se encontraba fuera del rango considerado sin riesgo de acidificación (Callaghan et al., 2002). Sin embargo, solamente los tratamientos con ARL presentaron problemas de acidificación, por lo que es importante destacar que la relación óptima de estos dos parámetros varía dependiendo de las condiciones del reactor (Brown & Li, 2013). Al final del experimento se presentaron los menores valores de la relación para todos los tratamientos, sin embargo, solamente los tratamientos ARL-SN y ARL-CN presentaron una relación AGV/alcalinidad por debajo de 0.4 considerada generalmente óptima.

### **Comportamiento del Amoníaco**

Teniendo en cuenta que bajas concentraciones de amoníaco (< 200 mg/L) son beneficiosas para el proceso de DA, al ser una importante fuente de nitrógeno para las bacterias (Chen, Cheng, & Creamer, 2008), pero que de encontrarse en altas concentraciones genera inhibición del proceso, el comportamiento del amoníaco fue favorable en todos los tratamientos estudiados (figura 5-24). Solamente en los tratamientos con ARL se superó el valor recomendado, en el día 7 y 28 para el tratamiento ARL-SN y en el día 28 para el tratamiento ARL-CN, cabe destacar que en estos días los valores se mantuvieron cercanos al valor recomendado.

Sin embargo, algunos autores sugieren valores incluso más bajos para garantizar la estabilidad del proceso, manifestando que aunque la concentración de amoníaco que puede llegar a causar inhibición depende del tipo de sustrato, del tipo de inóculo, de las condiciones ambientales como la temperatura, del pH y de los periodos de aclimatación (Zhang et al., 2014), valores de amoníaco mayores a 150mg/L son consideradas inhibitorias (Koppar & Pullammanappallil, 2008; Yenigün & Demirel, 2013). Esto podría ser una explicación del periodo de retraso en la producción de biogás presentado en los tratamientos con ARL, pues estos tratamientos presentaron valores por encima de 150 mg/L en la primera parte del experimento, mientras que en los tratamientos con EC, que no presentaron retraso, los valores se mantuvieron por debajo con solo una excepción en el día 14 cuando el tratamiento EC-CN sobrepasó este valor.

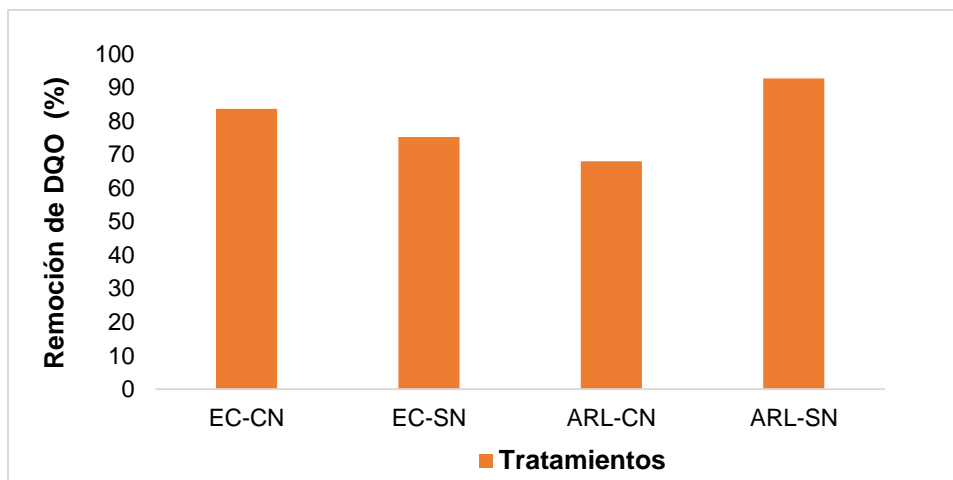


**Figura 5-24.** Comportamiento del amoníaco en la DA de EC y ARL, CN y SN

### Comportamiento de la DQO

Al comparar la DQOs inicial con la final hay una reducción para todos los tratamientos (figura 5-25). El mayor porcentaje de reducción se presentó en el tratamiento ARL-SN con 92.72%, seguido por los tratamientos EC-CN, EC-SN y, finalmente, ARL-CN con 83.59%, 75.25% y 67.98% respectivamente. El porcentaje de reducción para el tratamiento ARL-SN es superiores a lo reportado por Lehtomäki et al. (2008), quienes observaron una reducción de 86.67% al día 55, por el contrario, los demás tratamientos presentaron

rendimientos menores. Estos resultados coinciden con algunos autores que afirma que el rendimiento de metano está relacionado con la reducción de la DQOs (Kwietniewska & Tys 2014; Appels et al. 2011), pues los tratamientos que presentaron mayor porcentaje de reducción de la DQOs fueron los que presentaron mayor producción de metano.



**Figura 5-25.** Comportamiento de la DQOs en la DA de EC y ARL, CN y SN

### 5.3.1.2 Conclusiones de la evaluación del potencial de metano de co- sustratos y el efecto de la adición de nutrientes

La adición de nutrientes no produjo diferencias significativas en el potencial de metano de los residuos EB y ARL, pero si influyó en el grado de dispersión de los datos de los tratamientos.

El EC presentó estabilidad en el pH por lo que este residuo podría funcionar en un sistema de DA como único sustrato; por el contrario, el ARL presentó acidificación y requirió ajuste de pH, dando a entender que este material requiere de un co-sustrato que ayude a lograr un equilibrio de nutrientes para contrarrestar el problema de acidificación.

### 5.3.2 Efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en la producción de biogás del estiércol bovino

Desde el principio del experimento la producción de biogás fue mayor en los tratamientos con inóculo en comparación con aquellos sin inóculo, y la tendencia continuó hasta el final de la prueba (figura 5-26), aunque después de los 40 días el tratamiento EB+EC+ARL superó a uno de los tratamientos que contenía inóculo, el tratamiento EB+I. Después del día 15 fue evidente que la mayor producción de biogás era producida por los tratamientos que contenían inóculo y ARL.

El potencial final de metano de los tratamientos mostró diferencias significativas estadísticas ( $p < 0.0001$ ) (anexo D). A los 60 días, los tratamientos con ARL y con inóculo presentaron los mayores potenciales de metano  $0.671$  y  $0.605 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$  para los tratamientos EB+EC+ARL+I y EB+ARL+I respectivamente, con incrementos del 150% y 130% en comparación con el tratamiento que contenía inóculo pero no co-sustrato; seguidos de los tratamientos EB+EC+I, EB+EC+ARL y EB+I; y finalmente los tratamientos con el menor potencial de metano fueron EB, EB+EC y EB+ARL ( $\alpha = 0.05$ ). Esto significa que ARL tuvo un impacto positivo en el proceso de DA de EB, mejorado su eficiencia en la producción de metano.

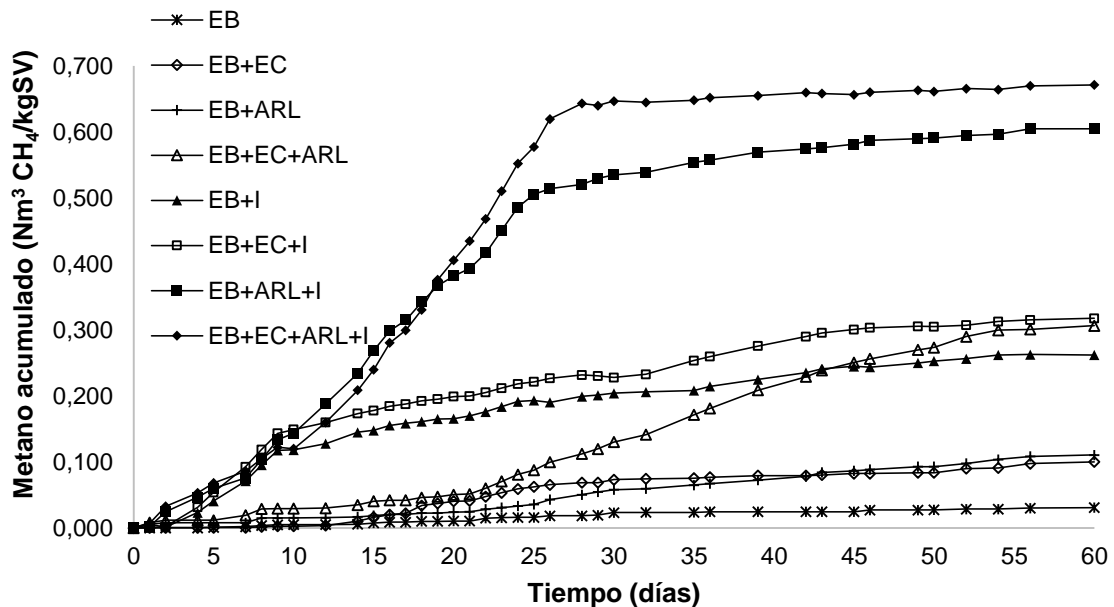


Figura 5-26. Potencial de metano de la co-digestión de EB con EC y ARL, con y sin inóculo

De acuerdo con los resultados, se puede notar que el inóculo tuvo una influencia positiva en la producción de metano. En este caso, un inóculo con una cantidad importante de microorganismos y bien adaptado contribuyó a la generación de metano, como fue descrito por Kawai et al. (2014), quien mencionó que la calidad y cantidad de inóculo es un factor clave para la implementación del proceso de DA. Estos autores concluyeron que una cantidad adecuada de inóculo mejora la hidrólisis, acelera la producción de biogás, reduce el tiempo de operación y ayuda a evitar la acidificación. No obstante, en muchos casos, la digestión de EB, gracias a la población microbiana que posee, se lleva a cabo sin adición de cualquier inóculo, según lo informado por Comino et al. (2012). La desventaja de no utilizar inóculo, sin embargo, es que en el inicio del proceso se puede experimentar una larga fase de latencia, como se observó en esta investigación.

La fase de latencia que se observó en los tratamientos sin inóculo puede ser causada por la inhibición debida a la alta concentración de sustrato, con respecto a la población microbiana proporcionada sólo por el EB (Dechrugsa et al., 2013; Raposo et al., 2009). La adición de un inóculo adaptado al EB aumentó la cantidad de metanógenos activos estimulando la actividad metanogénica y, por tanto, la producción de metano (Boulanger, Pinet, Bouix, Bouchez, & Mansour, 2012).

Con respecto al efecto del co-sustrato, el aumento del potencial de metano cuando EB fue co-digerido con ARL pudo darse debido al equilibrio de nutrientes que ARL proporciona al proceso de digestión (Marañón et al., 2012). Por otra parte, gracias a la capacidad tampón del EB (Dias et al., 2014), se impide la acidificación causada por ARL, un problema que se observó cuando ARL se digirió como un único sustrato. Por lo tanto, la co-digestión, como se describe por Agyeman & Tao (2014), mejora la estabilidad del proceso.

En la Tabla 5-10, se presenta el potencial de metano obtenida para los 8 tratamientos. Los tratamientos EB, EB + EC, y EB + ARL presentaron los rendimientos más bajos, con valores de 0.030, 0.100 y 0.111 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, respectivamente. Estos valores están por debajo de los rendimientos reportados por Castrillón et al. (2013), quienes presentan una comparación de la producción de metano a partir de diferentes sustratos, entre los cuales está el EB. Los rendimientos de metano reportados por estos autores están en el intervalo de 0.166 a 0.590 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> /kg SV, donde el valor más bajo corresponde a EB, como sustrato único, y el valor máximo para la co-digestión de EB con glicerina. Los resultados de estos

tratamientos también están por debajo de los reportados por Amon et al. (2007), quienes obtuvieron un potencial entre 0.125 y 0.166 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV al probar diferentes composiciones de EB resultante de la variación de la dieta de los animales.

**Tabla 5-10.** Potencial de metano del EB comparado con los co-sustratos EC y ARL y, con y sin inóculo

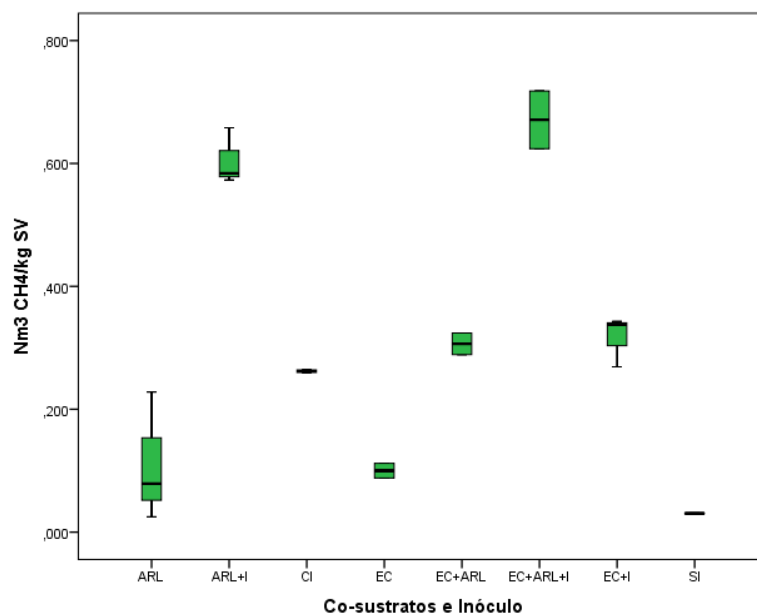
Tratamiento	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV	Desviación Estándar	Día de obtención del 90% de CH <sub>4</sub>
EB	0.030	0.001	50
EB+EC	0.100	0.012	54
EB+ARL	0.111	0.105	52
EB+EC+ARL	0.306	0.018	50
EB+I	0.262	0.002	42
EB+EC+I	0.317	0.041	42
EB+ARL+I	0.605	0.046	32
EB+EC+ARL+I	0.671	0.067	26

El potencial en los tratamientos EB+EC+ARL, EB+I y EB+EC+I presentó valores medios de 0.306, 0.262 y 0.317 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, respectivamente. Estos están por encima de lo informado por Kafle & Chen (2016), quienes obtuvieron un potencial de 0.204 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV usando estiércol de ganado lechero y un inóculo de un digestor de tratamiento de EB. La adición de EC no condujo a una diferencia significativa en el potencial de metano; sin embargo, se observó un pequeño aumento en comparación con EB solo. Esto es contrario a lo reportado por Garfí et al. (2011), quienes encontraron que el potencial de biogás disminuyó cuando EB fue co-digerido con EC en un biodigestor tubular, a una altitud de 2800 m s.n.m.

Para los tratamiento con los mejores potenciales de metano EB+EC+ARL+I y EB+ARL+I se obtuvo un potencial de metano de 0.671 y 0.605 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, respectivamente. Estos valores son cercanos y están por arriba de lo reportado por Castrillón et al. (2013), quienes reportaron un valor de 0.590 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV para la co-digestión de EB con glicerina; estos potenciales también son cercanos al valor superior del rango informado por Mata-Alvarez et al. (2014) de 0.18 a 0.6 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV para el EB con diferentes sustratos. Sin embargo, los potenciales obtenidos son menores que los potenciales de metano

reportados por Miranda et al. (2015) para el estiércol de ganado bovino lechero del oeste y el este de Europa y América del Norte, con valores de 1.00 y 0.908 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV.

Entre los dos tratamientos con los mejores potenciales no se presentaron diferencias significativas; sin embargo, para el tratamiento EB+EC+ARL+I se observó un pequeño aumento en comparación con EB+ARL+I quizás porque los dos co-sustratos proporcionan un balance de nutrientes más favorable para el proceso de DA. Por otro lado, el tratamiento EB+ARL+I presentó un menor grado de dispersión de los datos que el tratamiento EB+EC+ARL+I (figura 5-27).



**Figura 5-27.** Diagrama de cajas y alambres para el potencial de metano de EB con los co-sustratos EC y ARL con y sin inóculo

Además, se presentaron diferencias en los días de digestión en que se obtuvo aproximadamente el 90% de la producción de metano (tabla 5-10). El tratamiento con mayor producción de metano (EB+EC+ARL+I) fue el que produjo el 90% del potencial en el menor tiempo (26 días), seis días después se produjo el 90% del potencial del tratamiento EB+ARL+I. Hacia el día 42 se obtuvo el 90% del potencial de los tratamientos

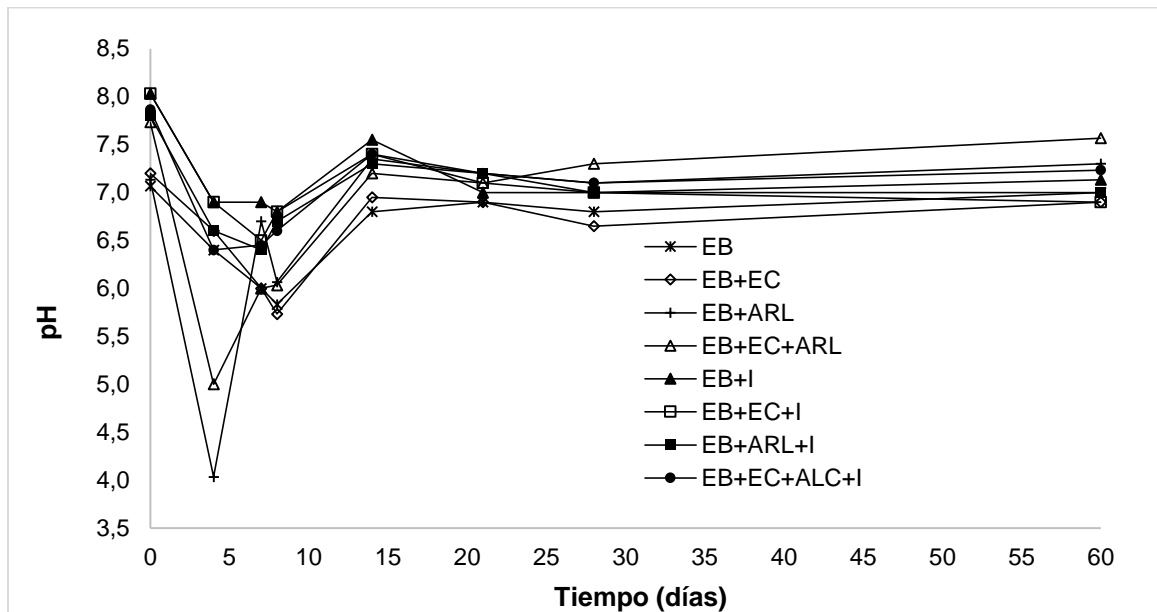


EB+I y EB+EC+I. Y finalmente, los tratamientos que tardaron más tiempo en lograr el 90% de potencial fueron EB, EB+EC+ARL, EB+ARL, y EB+EC a los 50, 50, 52 y 54 días respectivamente. Los días de digestión del tratamiento con los mejores rendimientos de metano (EB+EC+ARL+I) son comparables a lo obtenido por Kafle & Chen. (2016), quienes obtuvieron el 90% de la producción de biogás del EB a los 28 días de digestión, cuando evaluaron el PBM de cinco diferentes tipos de estiércol. Estas diferencias en los días de digestión de los tratamientos evaluados pueden representar ventajas importantes en un sistema de DA a escala real.

### 5.3.2.1 Comportamiento de los parámetros de control al evaluar el efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del estiércol bovino

#### Comportamiento de pH

El comportamiento de pH para este experimento se muestra en la Figura 5-28. La disminución de este parámetro se observa en los primeros días, coincidiendo con el proceso de hidrólisis. A medida que el proceso avanza el pH tiende a estabilizarse hacia la neutralidad, comportamiento normal en el proceso de DA.



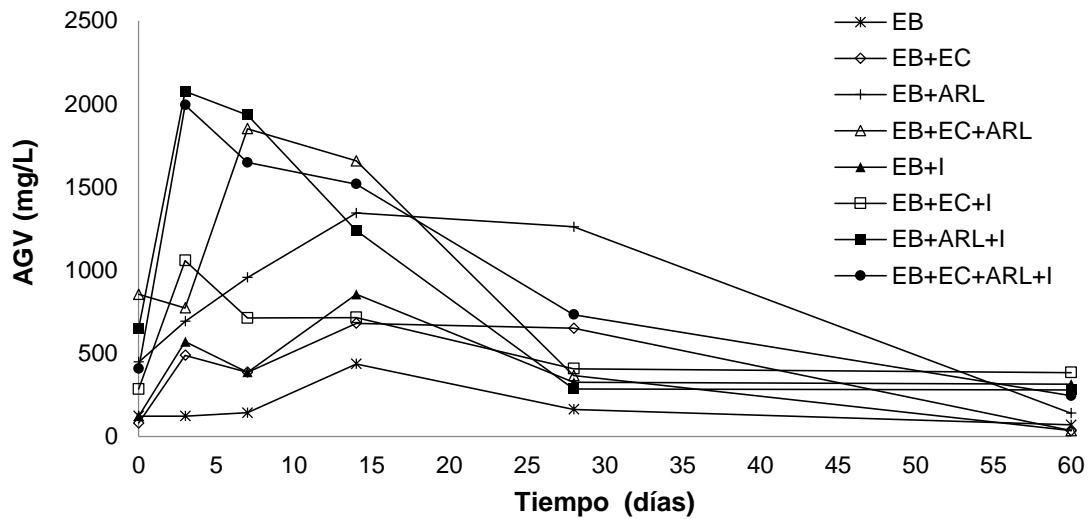
**Figura 5-28.** Comportamiento de pH en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo

Es de destacar que los tratamientos con ARL y sin inóculo experimentaron las disminuciones más drásticas de pH, lo que permitió confirmar que la DA de ARL requiere la adición de un co-sustrato que proporcione un equilibrio de nutrientes para prevenir la acidificación, como se evidenció en la prueba 1. Para estos tratamientos, fue necesario ajustar el pH en los días 4 y 8. De la misma manera, el pH se ajustó para los tratamientos EB y EB + EC en el día 8. Por el contrario, ninguno de los tratamientos con inóculo requirió el ajuste de pH, pues durante todo el experimento los valores estuvieron dentro o muy cerca al rango óptimo de 6.5 a 7.2.

### **Comportamiento de AGV y alcalinidad**

Los AGVs en los tratamientos con mayor producción de metano (EB+EC+ARL+I y EB+ARL+I) aumentaron hasta el día 3, luego empezaron a disminuir gradualmente hasta el final del experimento (figura 5-29), como es propio de un proceso de DA; por el contrario, en los otros tratamientos no se observó este comportamiento. La producción de AGVs en los primeros días del proceso para los tratamientos que contenían inóculo y ARL fue significativamente mayor que para el resto de tratamientos. De lo anterior, se puede inferir que el co-sustrato ARL facilitó el desarrollo de las primeras etapas del proceso, esto sumado a que el inóculo proporcionó la población microbiana necesaria, garantizó una mayor producción de AGV en comparación con los demás tratamientos.

Los AGVs producidos en la etapa acidogénica del proceso anaerobio se podrían transformar, gracias a los microorganismos acetógenos y a las bacterias metanogénicas, en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ; sin embargo, si estos ácidos no se consumen podrían llevar a disminuir el pH ocasionando una inhibición e incluso el fracaso del proceso (Zhang et al., 2014). Esto fue lo que, probablemente, ocurrió en los tratamientos sin inóculo, pues fue en estos tratamientos donde no se observó disminución importante de los AGVs hasta el día 25, día en el cual se observó una disminución para todos estos tratamientos, coincidiendo con los días en los que se generó un incremento en la producción de biogás, significativamente mayor para el tratamiento que contenía los dos co-sustratos EB+EC+ARL. Cabe resaltar que en ninguno de los tratamientos la concentración de AGVs superó los 5000 mg/L que, de acuerdo con Ehimen et al. (2011), indican inestabilidad en el proceso de DA.



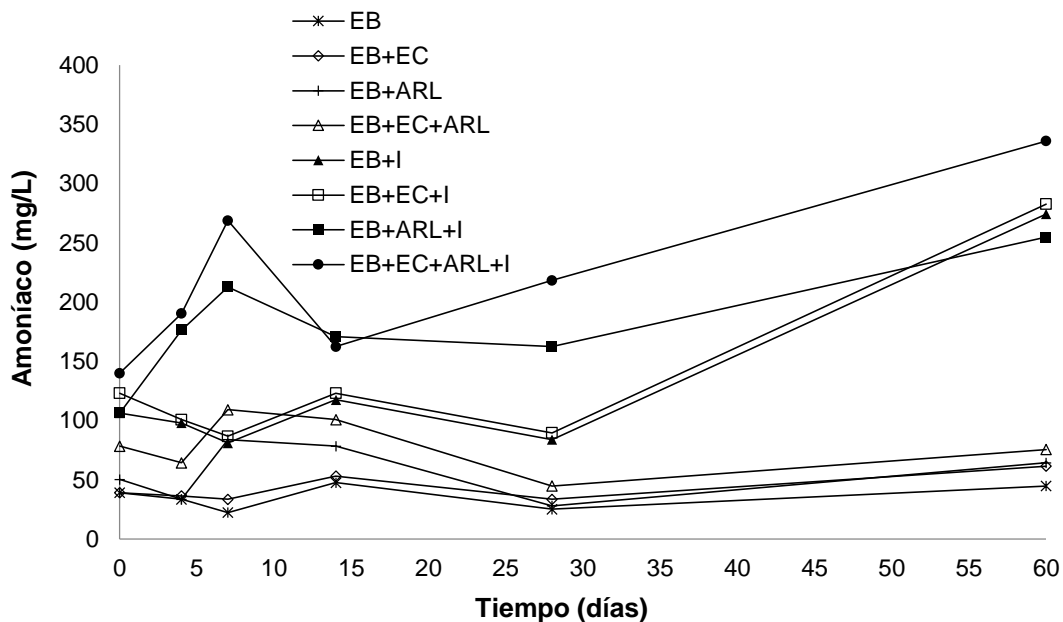
**Figura 5-29.** Comportamiento de los AGVs en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo

La relación AGV/alcalinidad en los tratamientos con inóculo aumentó hasta el día 3, ya para el día 7 en todos los tratamientos se observó disminución; por el contrario, en los tratamientos sin inóculo el incremento se observó hasta el día 14, excepto para el tratamiento EB+EC para el cual el incremento se observó hasta el día 7, días a partir de los cuales empieza a disminuir gradualmente. Para todos los tratamientos evaluados la relación estuvo por encima de los valores considerados óptimos, solo hasta el día 28 los tratamientos alcanzaron valores óptimos, excepto los tratamientos EB+EC y EB+ARL. Sin embargo, para los tratamientos con inóculo no se observó inhibición, pues la producción de metano no se detuvo, especialmente para los tratamientos con los mejores rendimientos (EB+EC+ARL+I y EB+ARL+I).

### Comportamiento de Amoníaco

El comportamiento del amoníaco durante los 60 días de duración del experimento se presenta en la figura 5-30. Los valores de amoníaco para los tratamientos sin inóculo mantuvieron valores considerados beneficiosos para el proceso de DA, con valores de 22-110 mg/L. Por el contrario, para los tratamientos con inóculo la concentración de amoníaco alcanzó valores por encima de 200 mg/L en especial para los tratamientos con inóculo que contenían ARL (EB+ARL+I y EB+EC+AR+I).

En cuanto a los tratamientos con inóculo y sin ARL (EB+I y EB+EC+I) las concentraciones de amoníaco solo superaron los 200 mg/L al final del proceso. Sin embargo, en ninguno de los tratamientos con inóculo se observó inhibición, por lo que es importante tener en cuenta que el amoníaco contribuye con el equilibrio de la relación C/N, y además puede aumentar la capacidad de amortiguamiento del pH, pues tiene la capacidad de reaccionar con los AGVs, neutralizándolos; de esta manera evita la inhibición por acumulación de AGVs y permite suficientes AGVs para la producción de biogás (Zhang et al., 2014).

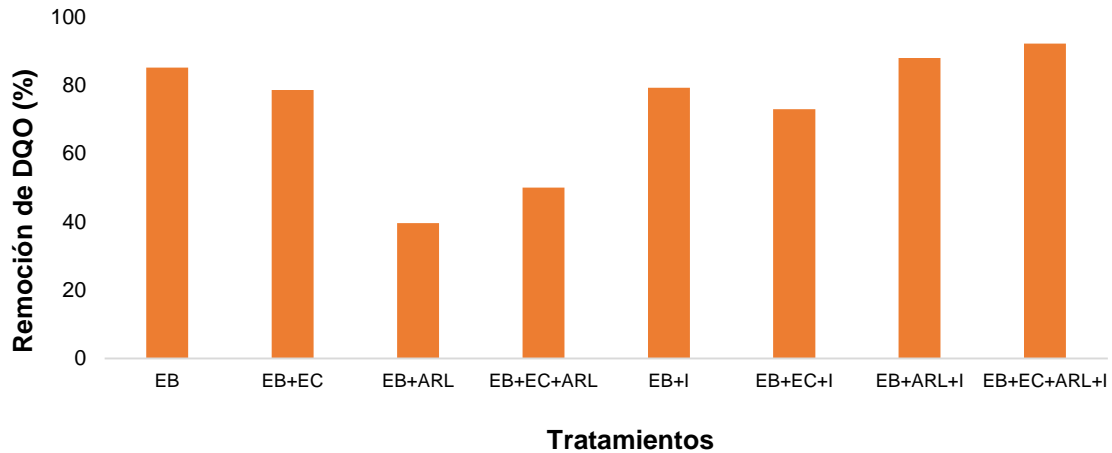


**Figura 5-30.** Comportamiento del amoníaco en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo

### Comportamiento de DQOs

Los tratamientos con la mayor producción de metano fueron los que presentaron la mayor reducción de la DQOs (figura 5-31). El tratamiento EB+EC+ARL+I con 92.24% y EB+ARL+I con 88.04%. Esta reducción de la DQOs evidencia la alta eficiencia de biogásificación, pues esta se calcula como un porcentaje de la DQO de alimentación convertida a metano (Koppar & Pullammanappallil, 2008). Para los demás tratamientos EB, EB+I, EB+EC, EB+EC+I, EB+EC+ARL y EB+ARL la DQOs se redujo 85.19%, 79.31%, 78.62%, 72.98%,

50.00% y 39.58% respectivamente. Todos los porcentajes de reducción de DQOs son mayores a lo reportado por Kafle & Chen. (2016), quienes reportaron una reducción entre la DQOs del afluente y del efluente de 10.42% en la DA de EB.



**Figura 5-31.** Comportamiento de la DQOs en la co-digestión anaerobia de EB con EC y ARL, con y sin inóculo

### 5.3.2.2 Conclusiones de la evaluación del efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en el potencial de biogás del estiércol bovino

Un aumento significativo en la producción de metano del EB se logró con la adición de inóculo y los co-sustratos ARL y EC. En ese sentido, la adición del inóculo adaptado ayudó a estabilizar el pH, impidiendo la acidificación.

El ARL aumentó significativamente el potencial de metano actuando como co-sustrato de EB; por el contrario, no se observó aumento significativo cuando el EC fue digerido con EB. Sin embargo, la mejor combinación para la producción de metano fue la mezcla de EB con ARL y EC.

Finalmente, de los resultados se puede inferir que la combinación de EB con ARL y EC, constituye un excelente material para ser manejado y aprovechado por DA con una producción de metano de interés comercial. Por lo cual, esta fue la mezcla seleccionada para la fase piloto.

## 5.4 Arranque del proceso de digestión anaerobia a escala piloto.

### 5.4.1 Diseño del sistema piloto

Uno de los factores más importantes que se tuvieron en cuenta cuando se realizó el diseño de los biodigestores a escala real, fue que éstos fueran de bajo costo. Esto implicó que los materiales para la construcción se encontraran dentro del mercado local, de manera que fueran fáciles de conseguir y que su valor no afectara significativamente el presupuesto de las familias.

Otro de los parámetros fundamentales para el diseño de los biodigestores fue la temperatura ambiente media del lugar. Dado que la temperatura marca la actividad bacteriana (Jaime Martí-Herrero, 2008), el TRH fue definido teniendo en cuenta las condiciones del lugar, garantizando el tiempo requerido por las bacterias para digerir la materia orgánica y producir biogás y, además, mejorar la calidad del digestato.

Los dos biodigestores instalados en la finca seleccionada se diseñaron de manera que el volumen efectivo fuera suficiente para tratar el EB recuperable. La finca seleccionada (figura 5-32) contaba con un total de 8 reses, 6 adultas y dos pequeños. Cada res adulta genera en promedio 23 kg de estiércol por día, por lo que las 6 reses adultas generan alrededor de 138 kg de EB por día. Pero, teniendo en cuenta que en la finca no se manejaba estabulado, de todo el estiércol generado solamente se contempló la recuperación del 20%, que correspondía a 28 kg de EB. Por lo tanto, cada biodigestor se diseñó para tratar 14 kg de EB.



**Figura 5-32.** Finca seleccionada para implementación de biodigestores tubulares de bajo costo

Con respecto a la generación del co-sustrato EC, la finca seleccionada cuenta con un sistema de cría de cuyes (figura 5-33), con una capacidad de 350 animales que, por las fechas del estudio, se encontraba funcionando cerca al 50% de su capacidad total. Esta cantidad de animales genera alrededor de 30 kg diarios de estiércol. Estos 30 kg corresponden a una mezcla de estiércol y residuos del pasto de alimentación. Sin embargo, teniendo en cuenta que en promedio cada familia posee 30 cuyes, y que la cantidad de estiércol para esta cantidad son aproximadamente 6 kg, esta fue la cantidad contemplada para la carga diaria.



**Figura 5-33.** Sistema de cría de cuyes en finca seleccionada para implementación de biodigestores tubulares de bajo costo

El ARL se tomó de uno de los tanques de frío, de la asociación lechera más cercana a la vivienda de la finca seleccionada para instalar las unidades piloto (figura 5-34). El tanque de frío tiene una capacidad de 1600 litros y funciona aproximadamente a la mitad de su capacidad. Para lavar cada cantina de 20 litros de capacidad los usuarios agregan alrededor de dos litros de agua por lo que por cada litro de leche llevado al tanque de frío se genera 0.1 litros de ARL. En las instalaciones del tanque de frío se genera alrededor de 80 litros diarios de ARL.

Teniendo en cuenta, la temperatura ambiente media, la cantidad de estiércol generado en la finca, y las propuestas de diseño de Jaime Martí-Herrero. (2008) para biodigestores

familiares de altiplano, se presentan los parámetros de diseño y dimensiones de 2 biodigestores para tratar el total del EB recuperable generado en la finca de estudio del municipio de Cumbal.



**Figura 5-34.** Generación de ARL en las instalaciones de uno de los tanques de frío perteneciente a una de las asociaciones del municipio de Cumbal

**Parámetros de diseño:**

Tiempo de retención: 75 días

Relación de carga estiércol - agua: 1:3

Fase líquida: 75% del volumen total

Fase gaseosa: 25% del volumen total

**Dimensiones de los biodigestores:**

Largo: 6.5 m

Ancho del rollo: 2 m

Volumen total: 8 m<sup>3</sup>

Volumen efectivo: 6 m<sup>3</sup>

**Carga diaria:** Para la carga diaria se mantuvo la relación de 70 % EB y 30% EC. La carga de alimentación diaria de 20 kg de estiércol (14 kg de EB + 6 kg de EC) y 60 litros de ARL. Esta mezcla tiene una concentración de 30 g SV/L.

**Reservorio:** Se construyó un reservorio para almacenar 4.5 metros cúbicos de biogás.

**Cantidad de Polietileno tubular necesario para cada biodigestor:** 6.5 m para el biodigestor + 1 m para amarres (15 m para las dos capas) + 4.3 m para reservorio incluidos los 80 cm necesarios para los amarres. En total para cada biodigestor se usaron 19.3 m de polietileno tubular.



### 5.4.2 Instalación de los biodigestores tubulares de bajo costo

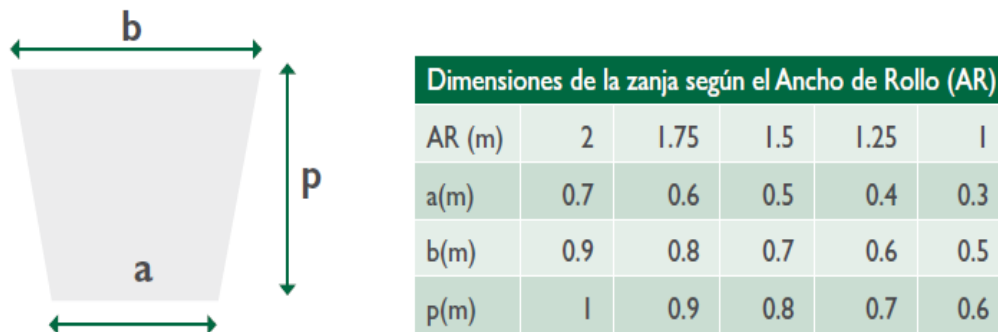
Para la instalación de los biodigestores se siguió la metodología de implementación de Martí-Herrero (2008). Los pasos para la instalación fueron los siguientes:

#### 1. Selección del sitio de instalación

El sitio para la instalación de los biodigestores fue seleccionado por la familia propietaria de la finca. Antes de que hicieran esta selección se les recomendó que fuera un sitio donde no transitaran animales y que se encuentre cercano al sitio donde se dará uso al biogás. Teniendo en cuenta la baja temperatura del sitio de instalación, la zanja se orientó a lo largo de este a oeste para aprovechar la radiación solar para calentamiento directo de los biodigestores.

#### 2. Excavación de la zanja

Las dimensiones de la zanja dependen del ancho de rollo que se decida usar (figura 5-35). El largo dependerá del tamaño obtenido en el diseño y variará dependiendo del volumen.

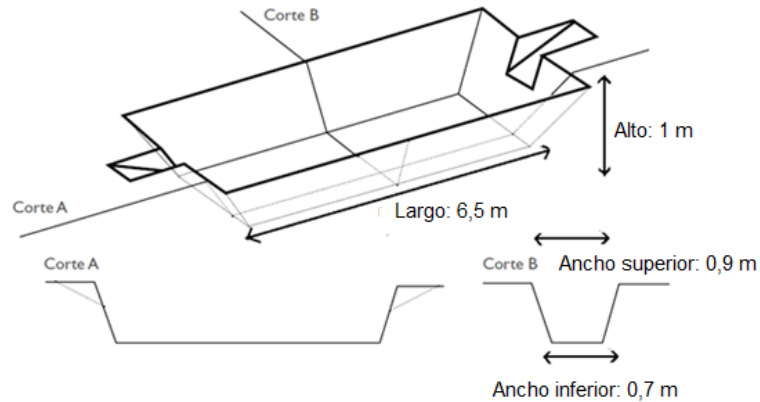


**Figura 5-35.** Dimensiones de la zanja para implementación de biodigestores de bajo costo, dependiendo del ancho de rollo

Fuente: Tomado de Martí-Herrero (2008)

Las dimensiones para el caso de los biodigestores instalados se presentan en la Figura 5-36 correspondientes a un ancho de rollo de 2 m. Una vez definidas las dimensiones de la zanja se inició la excavación. Teniendo en cuenta que, las paredes deben tener un grado de inclinación para evitar que se desmoronen, que el fondo debe estar nivelado y que se deben extraer las piedras y raíces que puedan romper el plástico del biodigestor. Los

canales donde reposarán los tubos de entrada y salida se cavaron con un ángulo de inclinación de 45°.

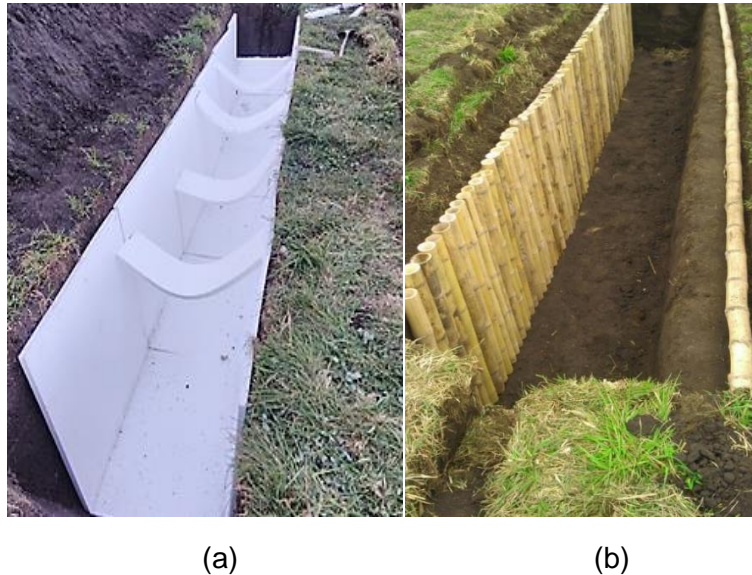


**Figura 5-36.** Forma de la zanja con sus dos cortes y dimensiones.

**Fuente:** Modificado de Martí-Herrero (2008)

### 3. Instalación de los aislantes

Una vez la zanja fue excavada y alistada con los requerimientos establecidos, se procedió a la instalación de los aislantes de icopor y de guadua (figura 5-37).



**Figura 5-37.** Zanjais con aislante de icopor (a) y aislante de guadua (b).

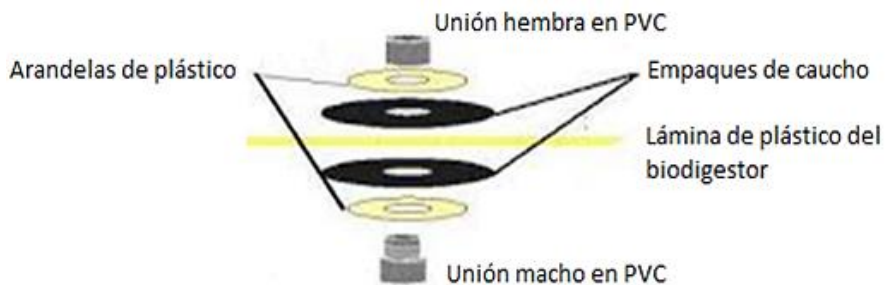
#### 4. Construcción de los biodigestores

Después de instalar los aislantes en cada zanja, se procedió a cortar el plástico con una longitud de 7.5 metros, de los cuales 6.5 metros son parte del biodigestor y 1 metro para asegurar el plástico a los tubos de llenado y salida de material. Para una mayor resistencia se utiliza dos capas de plástico tubular con el fin de incrementar su vida útil. Debido a la fragilidad del plástico este debe ser cortado con mucho cuidado y teniendo en cuenta que la superficie donde sea extendido esté libre de impurezas (figura 5-38).



**Figura 5-38.** Cortado del plástico tubular para la construcción de los biodigestores.

Una vez cortado el plástico se instaló la salida de biogás (figura 5-39), esta puede ser construida con materiales reciclables o puede ser adquirida en el mercado donde se la encuentra bajo el nombre de pasamuros o *flange*.



**Figura 5-39.** Instalación para la salida de biogás

Adicionalmente, se ubicó el mezclador dentro del plástico del biodigestor (figura 5-40). El mezclador se puede construir atando dos tapas plásticas, de al menos 30 centímetros de diámetro, a una sogá que sobresaldrá al menos 2 metros fuera de cada extremo del biodigestor; las tapas se deben ubicar en el centro de la sogá y deben tener una separación aproximada de 2 metros entre ellas.



**Figura 5-40.** Plástico con salida de biogás y mezclador instalados

Una vez instalados la salida del biogás y el mezclador se procedió a realizar el amarre del plástico a los tubos de entrada y salida de material. Para lo cual, el tubo se introdujo 80 cm dentro del plástico, 30 centímetros quedan libres dentro del biodigestor, 50 cm son usados para sellar la conexión con el amarre y los 20 centímetros restantes quedan por fuera del plástico. El sellado se hace cubriendo el tubo con el plástico en pliegues (figura 5-41-a), y recubriendo con neumático (figura 5-41-b), esto con el fin de dar un cierre hermético que no permita el escape de gas o líquido.



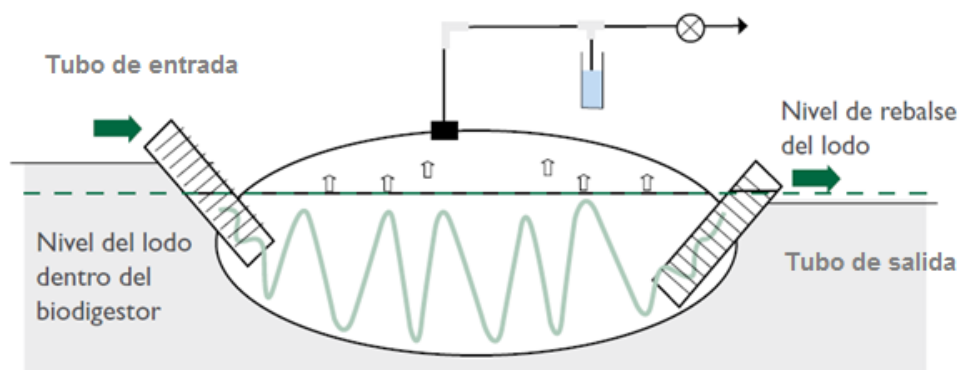
(a)

(b)

**Figura 5-41.** Amarre del biodigestor a los tubos de entrada (a) y salida de material (b).

### 5. Instalación del biodigestor en la zanja

Después de armado el biodigestor, se procedió a instalarlo en la zanja, teniendo cuidado de no doblarlo ni rosarlo con el piso o con algún elemento que lo pueda romper. En cuanto a la ubicación de los tubos, el de salida se ubicó al nivel de la altura de la zanja, correspondiente al nivel que alcanzará el material alimentado al biodigestor, en este caso 1 m; el tubo de entrada debe quedar más elevado como se muestra en la Figura 5-42, por lo que se ubicó de manera que la parte media de la zona de amarre coincida con el nivel de salida.



**Figura 5-42.** Instalación de los tubos de entrada y salida del material en la zanja

Fuente: Tomado de Martí-Herrero (2008)

Una vez se introdujo el biodigestor en la zanja y los tubos fueron amarrados de acuerdo con las especificaciones, se procedió a inflar el plástico con el fin de organizarlo y evitar que quede doblado, y también para garantizar que la válvula de salida del biogás quede totalmente centrada (figura 5-43).



**Figura 5-43.** Inflado y organización del biodigestor en la zanja

**6. Instalación de la tubería para conducción del biogás, manómetro, válvula de seguridad y “te” para liberación de agua acumulada en la tubería.**

Con el biodigestor totalmente inflado se instaló la tubería para la conducción del biogás. El primer tramo se construyó con tubería de PVC, como se muestra en la Figura 5-44.



**Figura 5-44.** Instalación para la conducción del biogás

Adicionalmente, cerca de la salida del biogás se instaló una válvula de seguridad, un manómetro para monitorear la presión del sistema por cuestiones de seguridad y una te para liberación de agua acumulada en la tubería (figura 5-45). La válvula de seguridad se construyó con tubería PVC y un galón reciclable de 3 litros, esto con el fin de liberar el exceso de presión que se pueda generar por el biogás y así evitar daños en el biodigestor. La tubería debe quedar sumergida de 8 -13 cm y se debe revisar constantemente para mantener el nivel inicial definido.

La instalación de la tubería de conducción del biogás hasta el reservorio (figura 5-46) se realizó luego del primer mes de la instalación y puesta en marcha de los biodigestores. Se recomienda hacer la instalación del reservorio cuando el biodigestor ya esté produciendo biogás y se encuentre inflado totalmente, por lo que puede esperar unos días después de la instalación.



**Figura 5-45.** Válvula de seguridad, manómetro y “te” para liberación de agua acumulada en la tubería



**Figura 5-46** Tubería de conducción de biogás hasta el reservorio



## 7. Primera carga de material

Luego de instalados los biodigestores se realizó la primera carga de material con tres carretillas de EB, dos carretillas de EC, 60 litros de ARL y se adicionó agua hasta lograr sellar el tubo de entrada y salida y así garantizar condiciones anaerobias dentro de los biodigestores. A B1 se le agregó 30 litros de inóculo (lodo de un digestor anaerobio alimentado con EB, operando a temperatura ambiente (13 °C de media) en el municipio de Pasto (Nariño)). La relación de inóculo utilizada fue de 5% en términos de SV. La primera carga correspondió al 35% del volumen efectivo de los biodigestores.

## 8. Instalación de la cubierta

Se construyó una cubierta con plástico tipo invernadero (figura 5-47) para proteger los biodigestores y lograr mantener una temperatura superior a la del ambiente, dentro de éstos.



**Figura 5-47.** Cubierta con plástico tipo invernadero

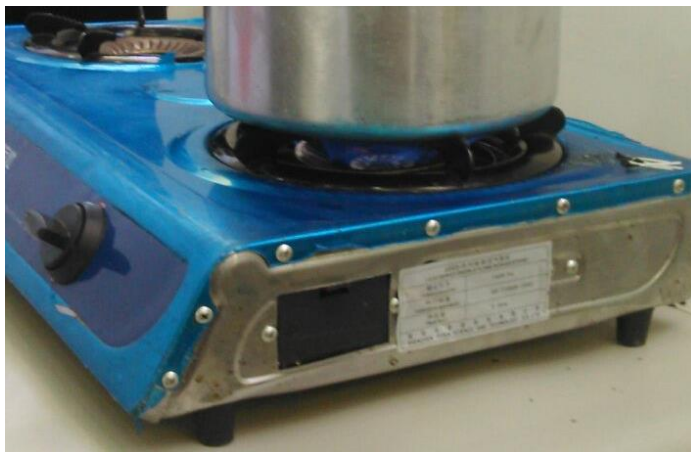
## 5.4.3 Seguimiento escala piloto

### 5.4.3.1 Seguimiento a la alimentación de los biodigestores

La alimentación recomendada para un funcionamiento adecuado de los biodigestores consistió en 80 litros diarios de la mezcla previamente establecida. A pesar de la capacitación proporcionada a la familia para un manejo adecuado del sistema y de la insistencia en la necesidad de alimentar diariamente a los biodigestores, la familia

encargada no logró realizar la alimentación según lo recomendado. Teniendo en cuenta el volumen ocupado por la carga inicial se contemplaba que en 56 días, a partir del arranque, se completaría el volumen efectivo. Sin embargo, el volumen efectivo se completó en más del doble de tiempo, 119 días después, tiempo en el cual el material digerido empezó a salir por el tubo de salida. Por lo que se pudo establecer que la alimentación en los 4 meses iniciales se realizó solamente con la mitad de lo establecido.

La familia inicialmente afirmaba que sólo algunos días no se realizaba la alimentación, luego a medida que fue pasando el tiempo y dado que el material no empezaba a salir manifestaron que, si bien la actividad de alimentar los biodigestores les parecía sencilla, fue complicado adaptarse a una nueva actividad diaria, reconociendo que frecuentemente se dejaba de cumplir con la alimentación. Sin embargo, luego de la instalación de la estufa que funciona con el biogás producido (figura 5-48), la familia pudo empezar a beneficiarse del sistema y entendieron que la producción de biogás depende de la alimentación diaria al biodigestor. Esto los motivó y en adelante el cuidado de los biodigestores mejoró. Otro aspecto importante que ayudó con el cuidado de los biodigestores por parte de la familia, fue que durante unos días se presentó escasez del gas propano en el municipio. Entonces, la familia y los vecinos empezaron a ver que la instalación de un biodigestor tubular de bajo costo, podría ser una alternativa para solucionar la problemática que se les presentaba, por no contar con el combustible que ellos usan como complementario para la preparación de sus alimentos.



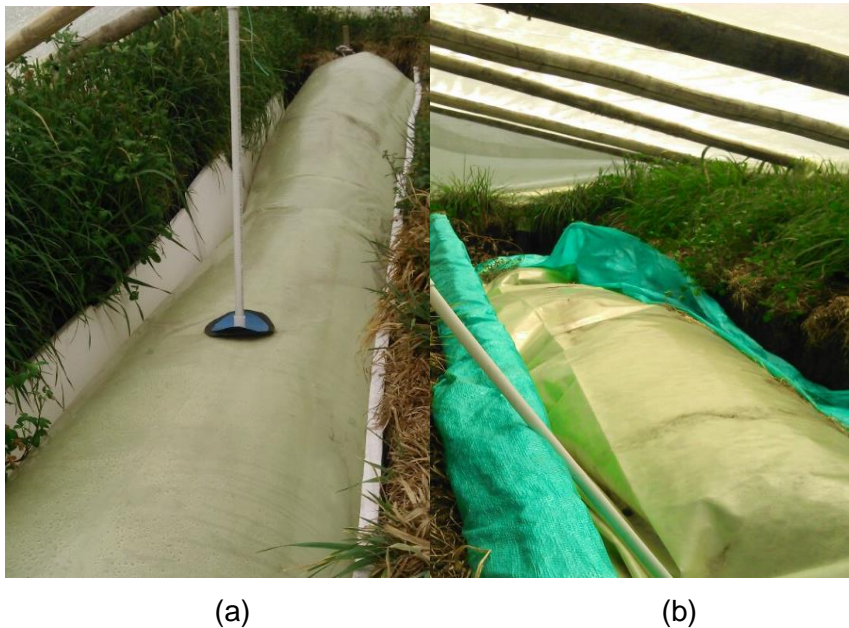
**Figura 5-48.** Estufa diseñada para funcionar con biogás, funcionando con el biogás producido por B1.

#### 5.4.3.2 Toma de muestras para el análisis de los parámetros de control

Se inició el seguimiento a los biodigestores, con la toma de muestras, a los 40 días después del arranque del proceso de DA. Las muestras fueron tomadas y transportadas a laboratorios de la Universidad de Nariño donde se realizaron los análisis respectivos relativos al control del proceso.

#### 5.4.3.3 Producción de biogás del sistema a escala piloto

La producción de biogás no inició al mismo tiempo para los dos biodigestores. Para B1 la producción de biogás fue evidente antes de completar el primer mes después del arranque; por el contrario, para B2 la producción de biogás sólo inicio a partir del tercer mes (figura 5-49). Esta diferencia en el inicio de la producción de biogás se pudo dar por la diferencia en el incremento de la temperatura lograda en B1 y B2, con respecto a la temperatura ambiente. Cabe resaltar que a B1, treinta días después del arranque, se le adicionaron 500 ml de lodo granular, proveniente de un digester anaerobio alimentado con vinazas de un ingenio azucarero. Tres días después de realizar esta re-inoculación, el volumen del biodigestor dispuesto para almacenar el biogás se llenó completamente, evidenciando el incremento significativo en la producción de biogás.



**Figura 5-49.** Biodigestores B1 (a) y B2 (b) durante el tercer mes de funcionamiento.

Durante el tercer mes, la producción de biogás por parte de B1, ya era suficiente para una hora de funcionamiento de la estufa que requiere 0.9 m<sup>3</sup> de biogás por hora. Por el contrario, para B2 la producción de biogás al tercer mes era insuficiente para ser aprovechado. Esta producción de biogás concuerda con los datos de producción esperados con esta cantidad de estiércol, pues de acuerdo con Jaime Martí-Herrero, (2008) se obtendrían aproximadamente 0.706 m<sup>3</sup> de biogás por día siempre que se cumplan los tiempos de retención adecuados a cada temperatura de trabajo.

Desafortunadamente, el cuarto mes de funcionamiento coincidió con las celebraciones de navidad y de año nuevo y la familia suspendió por completo la alimentación a los biodigestores, por lo que B1 disminuyó la producción de biogás al punto que solo se conseguían unos cuantos minutos de funcionamiento al día y en ocasiones la llama de la estufa ni siquiera prendía. Para B2 la producción de biogás, que era baja, se detuvo y no se observó un incremento considerable. De esta manera, se evidenció que el correcto funcionamiento de los biodigestores y la posibilidad de aprovechar el biogás dependen del compromiso de las familias con la correcta operación y mantenimiento del sistema. Por lo que, es importante tener en cuenta que para desarrollar proyectos de implementación; las entidades o los profesionales encargados deben buscar estrategias para lograr que los usuarios de la tecnología garanticen un manejo adecuado.

La deficiencia en la alimentación de los biodigestores familiares y por lo tanto la afectación del rendimiento del sistema también fue observada por Martí-Herrero et al. (2015), quienes al tratar de entender la influencia del comportamiento de los usuarios en el rendimiento de digestores tubulares, a través de una técnica y un enfoque social en el contexto boliviano observaron que algunos biodigestores se cargaban menos del 25% de los días.

### **Porcentaje de metano**

Al tercer mes de funcionamiento el porcentaje de CH<sub>4</sub> del biogás generado por B1 estuvo entre 61-69%. Este contenido de metano es superior al reportado por (Comino, Rosso, & Riggio, 2009), quienes reportaron un 51,4% de metano en el biogás del día 56 al evaluar la DA de EB y la mezcla de suero de leche a escala piloto. Estos porcentajes concuerdan con lo reportado por Garfí, Martí-Herrero, Garwood, & Ferrer. (2016), quienes reportan un contenido de metano en el biogás generado en digestores tubulares domésticos a escala piloto y a escala real en América Latina, entre 40 y 70%. Además concuerda con los

contenidos de metano presentados por Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi. (2013), quienes, de acuerdo con su revisión, presentan que el contenido de metano del biogás puede variar de 40 a 70%. Por su parte la cromatografía de gases realizada para analizar la composición de los compuestos orgánicos volátiles en el biogás arrojó que, el porcentaje relativo de metano fue de 94.99 ( $\pm 8.67$ ), 45.62 ( $\pm 45.22$ ), 93.98 ( $\pm 10.4$ ) y 87.58 ( $\pm 14.02$ ) para los días 60, 70, 80 y 90 respectivamente.

#### 5.4.3.4 Comportamiento de los parámetros de control de la digestión anaerobia en la evaluación a escala piloto

##### Comportamiento del pH

El pH para los dos biodigestores se mantuvo dentro del rango óptimo de 6.5 a 7.2, solamente hacia el día 74 en B2 bajó hasta 6.34, recuperándose posteriormente sin necesidad de intervención (figura 5-50).

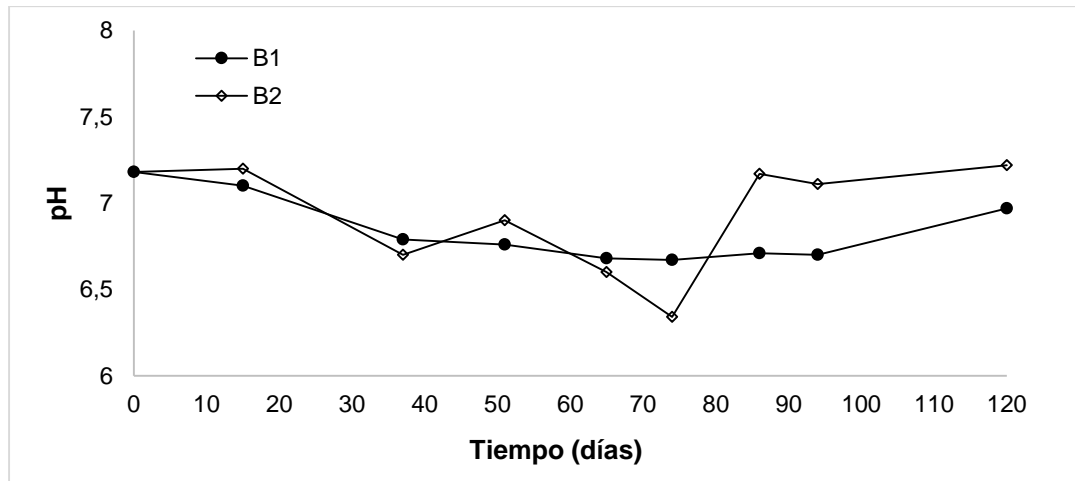


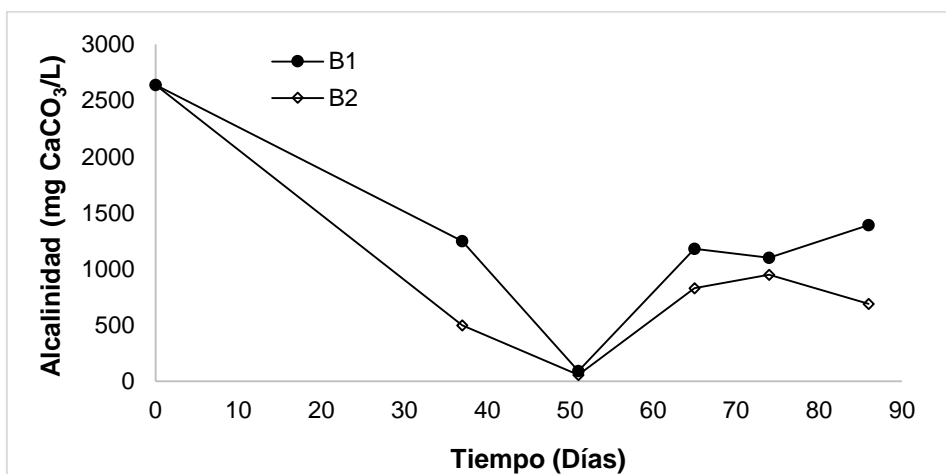
Figura 5-50. Comportamiento de pH en los biodigestores B1 y B2

##### Comportamiento de AGVs y alcalinidad

En la composición de los AGVs de la fracción líquida, para los dos reactores predominó el ácido acético. En el día cero del arranque de los biodigestores la composición de los AGVs en la mezcla cargada a los biodigestores fue de 18.19% ácido acético y 81.81% ácido propiónico. Al finalizar el segundo mes de la puesta en marcha, el contenido de ácido

acético fue de 82.09 y 76.74% para B1 y B2 respectivamente, mientras que el contenido de ácido propiónico fue de 17.91 y 23.26%. La prevalencia del ácido acético en la composición de los AGVs es común en los efluentes de DA en plantas de biogás (Jin, Li, Zhao, Angelidaki, & Zhang, 2016). Estos resultados coinciden con lo reportado por (Cadavid-Rodríguez & Horan, 2014) quienes encontraron que el ácido acético fue el principal componente de los AGVs al evaluar la producción de AGVs a partir de la DA de lodos de aguas residuales. El hecho de que, el porcentaje de ácido acético en los AGVs de B1 fuera mayor al porcentaje encontrado en B2, podría explicar la mayor producción de biogás en B1, pues según Gould (2015), el principal mecanismo para crear metano en la metanogénesis es el camino en el que interviene el ácido acético.

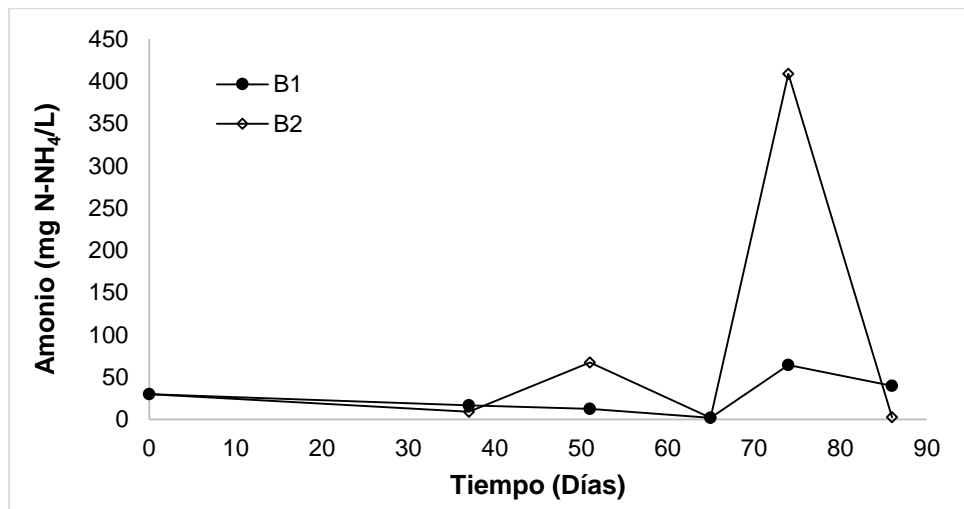
Por su parte, la alcalinidad en B1 y B2 disminuyó hasta el día 51 (figura 5-51), luego se incrementó coincidiendo con lo reportado por (Comino et al., 2009) quienes reportaron un incremento en la alcalinidad desde el día 16 hasta el 56 al evaluar un digestor anaerobio a escala piloto para la producción de biogás a partir de EB y mezcla de suero de leche. La disminución de la alcalinidad hasta el día 51, se pudo dar por el grado de dilución del material debido a la cantidad de agua adicionada al inicio del proceso, pues el valor de la alcalinidad del día cero corresponde a la mezcla inicial antes de ingresar a los biodigestores.



**Figura 5-51.** Comportamiento de la alcalinidad en los biodigestores B1 y B2

### Comportamiento de Amonio

Los niveles de amonio durante el proceso de DA se presentan en la figura 5-52. Los valores se mantuvieron dentro de los rangos considerados beneficiosos para DA. En B2 se presentó un incremento significativo en la concentración de amonio, hacia el día 74, superando el rango considerado como beneficioso para el proceso (50-200 mg N-NH<sub>4</sub>/L) pero sin sobrepasar el rango de 200-1000 mg N-NH<sub>4</sub>/L en el cual no se esperan efectos negativos (Rajagopal, Massé, & Singh, 2013). Además, es importante destacar que los valores de amonio son muy lejanos a los valores considerados como inhibitorios (1500-3000 mg N-NH<sub>4</sub>/L) y que adicionalmente el comportamiento del pH en los dos biodigestores al mantenerse dentro o cercano al rango óptimo (6.5 – 7.2) favoreció la estabilidad del proceso, pues a pH alto el riesgo de inhibición por amonio incrementa.

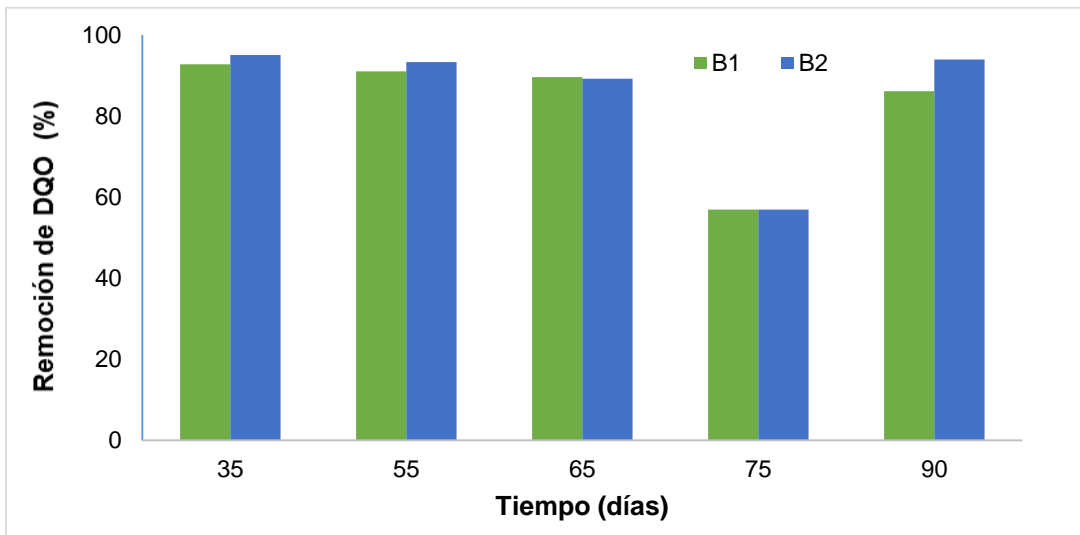


**Figura 5-52.** Comportamiento del amonio en los biodigestores B1 y B2

### Comportamiento de DQOs

Los porcentajes de reducción de DQOs fueron superiores al 50% para los dos biodigestores (figura 5-53). Para B1 los porcentajes de reducción fueron de 92.69, 90.97, 89.54, 56.90 y 86.09, para B2 fueron de 95.03, 93.24, 89.20, 56.90 y 93.91 para los días 35, 55, 65, 75 y 90 respectivamente. Estos porcentajes de reducción, excepto por algunos valores, coinciden con lo reportado por Lansing et al. (2010) quienes reportaron

reducciones superiores al 90% en un proceso de DA de nueve meses de funcionamiento. Cabe resaltar que los altos porcentajes de reducción de DQOs en tan corto tiempo de funcionamiento pueden deberse a la acumulación de MO dentro del biodigestor (Lansing et al., 2010). Además, debido a que los propietarios de la finca no realizaron la alimentación de los biodigestores diariamente, los porcentajes de reducción de DQOs pueden ser causa más de la dilución por la cantidad de agua en la carga inicial que por el proceso de digestión.



**Figura 5-53.** Comportamiento de la DQOs en los biodigestores B1 y B2

#### 5.4.3.5 Incremento de la temperatura

Con el uso de los aislantes y de la cubierta tipo invernadero, se logró un incremento significativo de la temperatura dentro de los biodigestores con respecto a la temperatura ambiente. El incremento en el caso de B1 fue de 10 °C y en el caso de B2 fue de 8 °C. De manera que, con los aislantes y la cubierta se logró mejorar la temperatura del proceso. El incremento de la temperatura mejoró las condiciones del proceso pues, sin exceder los límites del proceso, a mayor temperatura mayor producción de biogás (Mao et al., 2015).



### 5.4.3.6 Calidad del digestato

Luego de realizar análisis físico-químicos y microbiológicos a los digestatos obtenidos de B1 y B2, se encontró que no cumplen con los requerimientos establecidos en la norma NTC 5167 para ser clasificados como abonos o fertilizantes orgánico-minerales líquidos (tabla 5-11). El digestato obtenido en B1 no cumple con la totalidad de los parámetros físico-químicos ni con la totalidad de los requisitos microbiológicos establecidos en la norma. Por su parte, el digestato obtenido en B2 no cumple con la totalidad de los parámetros físico-químicos pero si con los requisitos microbiológicos analizados. Sin embargo, el digestato resultante podría llegar a cumplir con los requerimientos de la norma NTC 5167 para ser clasificado como abono o fertilizante orgánico-mineral líquido, bajo las condiciones evaluadas, si se garantiza una alimentación diaria, por lo que no se debe descartar como alternativa pues esto representaría grandes ventajas para las familias.

**Tabla 5-11.** Parámetros evaluados a los digestatos de B1 y B2 y su comparación con la norma NTC 5167

Parámetro	Método	Técnica	Unidades	Valor obtenido B1	Valor obtenido B2	Valor de referencia NTC 5167
Coliformes totales	NMP	Tubos múltiples	No. de Bacterias/ml	≥2400	460	<1000
Salmonella/25g	Presencia/Ausencia	Aislamiento e identificación	Positivo/Negativo	Ausente	Ausente	Ausente
Carbono orgánico oxidable	Walkley Black	Colorimétrica	g/L	1.63	0.82	≥20
Nitrógeno	Kjeldahl	Titulométrica	g/L	0.76	0.17	≥15
pH	NTC 5167	Electrométrica	-	7.04	7.07	≤ 8.5



## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se logró estudiar el efecto del inóculo en la digestión anaerobia del estiércol bovino y se seleccionaron 2 co-sustratos que mejoraron significativamente la producción de metano. Se adquirió experiencia en la implementación de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto, lo cual permitió adquirir habilidades, tanto en aspectos técnicos como sociales, indispensables para garantizar un uso adecuado de la tecnología. Se logró, además, adquirir experiencia en el trabajo con comunidades e identificar de forma directa las necesidades de avanzar en la implementación de la tecnología de digestión anaerobia para contribuir a mejorar la calidad de vida de los pobladores rurales y a la protección del ambiente. Otro aspecto a destacar, es que la divulgación de resultados del proyecto de investigación, en un evento científico de carácter internacional (Anexo E) y uno nacional (Anexo F), permitió el establecimiento de relaciones sinérgicas, entre investigadores, útiles para impulsar el desarrollo de la tecnología de digestión anaerobia.

Con la adición de inóculo y los co-sustratos estiércol de cuy y aguas residuales lácteas se logró un aumento significativo en la producción de biogás a partir de estiércol bovino. Además, las ventajas de la adición de un inóculo adaptado se reflejaron en un comportamiento estable del pH y ausencia de acidificación.

Las aguas residuales lácteas aumentaron significativamente el potencial de biogás al actuar como co-sustrato en la digestión del estiércol bovino; por el contrario, no se observó un aumento significativo cuando el estiércol de cuy se usó como co-sustrato. Sin embargo, la mejor combinación para la producción de metano fue la mezcla de estiércol bovino con los dos co-sustratos.

Se encontró que con los co-sustratos estiércol de cuy y aguas residuales lácteas no es necesario la adición de nutrientes para la producción de biogás a partir de estiércol bovino.

El manejo y aprovechamiento del estiércol bovino en co-digestión con estiércol de cuy y agua residual láctea, mediante la tecnología de digestión anaerobia, con el uso de biodigestores tubulares de bajo costo, permite reducir los impactos ambientales ocasionados por estos residuos y, al mismo tiempo, ofrece una alternativa energética para las familias rurales del municipio de Cumbal-Nariño. Sin embargo, el éxito o el fracaso de dicha alternativa depende directamente de la disposición de las familias para alimentar los biodigestores diariamente y, en general, realizar una adecuada operación y mantenimiento del sistema de digestión anaerobia. Sin el compromiso de las familias, la alternativa no sería efectiva.

## **6.2 Recomendaciones**

La implementación de digestores tubulares de bajo costo puede ayudar a mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales. Para que esto se pueda dar, es necesario que las familias que decidan beneficiarse de la tecnología de digestión anaerobia reciban una capacitación acerca del funcionamiento de la misma, los requerimientos, los compromisos que deben asumir durante la etapa inicial donde los beneficios no se manifestaran y luego cuando el proceso se estabilice y empiecen a disfrutar de las ventajas. Además, el acompañamiento por parte de un profesional conocedor del tema hasta la estabilización del proceso es fundamental para motivar a los usuarios a cuidar el sistema cuando se sientan desanimados.

Es fundamental diseñar y evaluar estrategias para asegurar la sostenibilidad de la instalación de biodigestores, esto, dada la importancia social y ambiental que puede representar el aprovechamiento adecuado de esta tecnología.

A nivel de investigación, es importante realizar estudios que permitan constatar el efecto de la inoculación con lodo granular en un sistema de digestión anaerobia a pequeña o mediana escala, incluyendo diseños experimentales que evalúen el efecto tanto en el arranque como en el desarrollo posterior del proceso de digestión.

Finalmente se recomienda potenciar el apoyo, por parte de las Instituciones Educativas, a la participación de investigadores en eventos académicos de carácter nacional e internacional, pues esto permite fortalecer la construcción de conocimiento.

## Bibliografía

- Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2016). Evaluation of methane generation and process stability from anaerobic co-digestion of sugar beet by-product and cow manure. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 121(5), 566–572.
- Agyeman, F. O., & Tao, W. (2014). Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, 133, 268–274.
- Alcaldía Municipal de Cumbal Nariño. (2012). Plan de Desarrollo Cumbal Nariño 2012-2015. Recuperado Mayo 20, 2016, de:  
[http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/C/cumbal\\_narino\\_pd\\_2012-2015/cumbal\\_narino\\_pd\\_2012-2015.asp](http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/C/cumbal_narino_pd_2012-2015/cumbal_narino_pd_2012-2015.asp)
- Alcaldía de Cumbal. (2012). Nuestro Municipio. Recuperado Mayo 22, 2016, de:  
[http://www.cumbal-narino.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.cumbal-narino.gov.co/informacion_general.shtml)
- Alexis, P.-O. B., Patricia, T.-L., Fernando, M.-R. L., Marcela, C.-C. L., Carlos, V.-F., Alexander, T.-L. W., & Abdón, O.-A. J. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería, Investigación Y Tecnología*, 16(4), 515–526.
- Alvarez, R., & Liden, G. (2008). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource Technology*, 99(15), 7278–7284.
- Amani, T., Nosrati, M., & Sreekrishnan, T. R. (2010). Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects — a review. *Environmental Reviews*, 18(NA), 255–278.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., & Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure-Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,

118(1–4), 173–182.

- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, a. J., ... Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934.
- APHA, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA.
- Appels, L., Lauwers, J., Degrève, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., ... Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production : Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295–4301.
- Ashekuzzaman, S. M., & Poulsen, T. G. (2011). Optimizing feed composition for improved methane yield during anaerobic digestion of cow manure based waste mixtures. *Bioresource Technology*, 102(3), 2213–2218.
- Boulanger, A., Pinet, E., Bouix, M., Bouchez, T., & Mansour, A. a. (2012). Effect of inoculum to substrate ratio (I/S) on municipal solid waste anaerobic degradation kinetics and potential. *Waste Management*, 32(12), 2258–2265.
- Brown, D., & Li, Y. (2013). Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource Technology*, 127, 275–280.
- Browne, J. D., Allen, E., & Murphy, J. D. (2013). Improving hydrolysis of food waste in a leach bed reactor. *Waste Management*, 33(11), 2470–2477.
- Cadavid-Rodríguez, L. S., & Horan, N. J. (2014). Production of volatile fatty acids from wastewater screenings using a leach-bed reactor. *Water Research*, 60, 242–249.
- Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., & Forster, C. F. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass & Bioenergy*, 27, 71–77.
- Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ormaechea, P., & Marañón, E. (2013). Methane production from cattle manure supplemented with crude glycerin from the biodiesel industry in CSTR and IBR. *Bioresource Technology*, 127, 312–317.
- Cata Saady, N. M., & Massé, D. I. (2015). Impact of organic loading rate on the

- performance of psychrophilic dry anaerobic digestion of dairy manure and wheat straw: Long-term operation. *Bioresource Technology*, 182, 50–57.
- Cendales Ladino, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol de bovino para su utilización de energía renovable*. Recuperado Enero 15, 2016, de:  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064.
- Comino, E., Riggio, V. a., & Rosso, M. (2012). Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. *Bioresource Technology*, 114, 46–53.
- Comino, E., Rosso, M., & Riggio, V. (2009). Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix. *Bioresource Technology*, 100(21), 5072–5078.
- DANE. (2010). *Perfil Cumbal Nariño*. Recuperado Mayo 22, 2016, de:  
[http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL\\_PDF\\_CG2005/52227T7T000.PDF](http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/52227T7T000.PDF)
- Dechrugsa, S., Kantachote, D., & Chairapat, S. (2013). Bioresource Technology Effects of inoculum to substrate ratio , substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. *Bioresource Technology*, 146, 101–108.
- Demirel, B., Yenigun, O., & Onay, T. T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewaters : a review. *Process Biochemistry*, 40, 2583–2595.
- Dhaked, R. K., Singh, P., & Singh, L. (2010). Biomethanation under psychrophilic conditions. *Waste Management*, 30(12), 2490–2496.
- Dias, T., Fragoso, R., & Duarte, E. (2014). Anaerobic co-digestion of dairy cattle manure and pear waste. *Bioresource Technology*, 164, 420–423.
- Ehimen, E. A., Sun, Z. F., Carrington, C. G., Birch, E. J., & Eaton-rye, J. J. (2011). Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process. *Applied Energy*, 88(10), 3454–3463.
- Elbeshbishy, E., Nakhla, G., & Hafez, H. (2012). Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. *Bioresource Technology*, 110, 18–25.

- Fonoll, X., Astals, S., Dosta, J., & Mata-Alvarez, J. (2015). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and fruit wastes: Evaluation of the transitory states when the co-substrate is changed. *Chemical Engineering Journal*, 262, 1268–1274.
- Gao, X., Liu, X., & Wang, W. (2016). Biodegradation of particulate organics and its enhancement during anaerobic co-digestion of municipal biowaste and waste activated sludge. *Renewable Energy*, 96, 1086–1092.
- Garfí, M., Ferrer-Martí, L., Perez, I., Flotats, X., & Ferrer, I. (2011). Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*, 37(12), 2066–2070.
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599–614.
- Gobernación de Nariño. (2012). *Plan de desarrollo departamental 2012-2015*. Recuperado Abril 10, 2016, de: [http://narino.gov.co/dependencias/files/SecretariasyDependencias/cooperacionInternacional/NARIO\\_-\\_Nario\\_mejor\\_Plan\\_Desarrollo\\_Ordenanza\\_-\\_2012-2015.pdf](http://narino.gov.co/dependencias/files/SecretariasyDependencias/cooperacionInternacional/NARIO_-_Nario_mejor_Plan_Desarrollo_Ordenanza_-_2012-2015.pdf)
- Gobernación de Nariño. (2014). *Inventario de Producción Agropecuaria en el Departamento de Nariño*. Recuperado Junio 12, 2016, de: <https://ganadatos.narino.gov.co/?q=dataset/inventario-de-producción-agropecuaria-en-el-departamento-de-nariño>
- Gould, C. M. (2015). Bioenergy and anaerobic digestion. Chapter 18. *Bioenergy*, 297–317.
- Hristov, A. N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., ... Oosting. (2013). *Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera*. Recuperado Marzo 11, 2016, de: <http://www.fao.org/3/a-i3288s.pdf>
- IDAE. (2007). "Biomasa: Digestores anaerobios" . Recuperado Mayo 22, 2016, de [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_Digestores\\_Anaerobios\\_A2007\\_0d62926d.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf)



- Ileleji, K. E., Martin, C., & Jones, D. (2015). *Basics of Energy Production through Anaerobic Digestion of Livestock Manure*. *Bioenergy*, Chapter 7, 287-295.
- International Energy Agency. (2014). *Renewable Energy. Medium-Term Market Report 2014. Market Analysis and Forecasts to 2020. Executive Summary*.
- Jin, X., Li, X., Zhao, N., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2016). Bio-electrolytic sensor for rapid monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion process. *Water Research*, 111, 74–80.
- Kafle, G. K., & Chen, L. (2016). Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste Management*, 48, 492–502.
- Kawai, M., Nagao, N., Tajima, N., Niwa, C., Matsuyama, T., & Toda, T. (2014). The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield. *Bioresource Technology*, 157, 174–180.
- Kim, J., Kim, H., Baek, G., & Lee, C. (2016). Anaerobic co-digestion of spent coffee grounds with different waste feedstocks for biogas production. *Waste Management*, 60, 322–328.
- Koppar, A., & Pullammanappallil, P. (2008). Single-stage, batch, leach-bed, thermophilic anaerobic digestion of spent sugar beet pulp. *Bioresource Technology*, 99(8), 2831–2839.
- Kwietniewska, E., & Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491–500. ht
- Lansing, S., Martin, J. F., Botero, R. B., da Silva, T. N., & da Silva, E. D. (2010). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology*, 101(12), 4362–4370.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S., Lehtinen, T. M., & Rintala, J. A. (2008). Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production. *Bioresource Technology*, 99(8), 3267–78.
- Lin, Y., Wang, D., Li, Q., & Xiao, M. (2011). Mesophilic batch anaerobic co-digestion of

pulp and paper sludge and monosodium glutamate waste liquor for methane production in a bench-scale digester. *Bioresource Technology*, 102(4), 3673–3678.

- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555.
- Marañón, E., Castrillón, L., Quiroga, G., Fernández-Nava, Y., Gómez, L., & García, M. M. (2012). Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Management*, 32(10), 1821–1825.
- Martí-Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. GTZ-Energía. Bolivia. GTZ-Energía (Vol. 53).
- Martí-Herrero, J., Alvarez, R., Rojas, M. R., Aliaga, L., Céspedes, R., & Carbonell, J. (2014). Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresource Technology*, 167, 87–93. h
- Martí-Herrero, J., Ceron, M., Garcia, R., Pracejus, L., Alvarez, R., & Cipriano, X. (2015). The influence of users' behavior on biogas production from low cost tubular digesters: A technical and socio-cultural field analysis. *Energy for Sustainable Development*, 27, 73–83.
- Martí-Herrero, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, 108, 21–7.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427.
- Miranda, N. D., Granell, R., Tuomisto, H. L., & McCulloch, M. D. (2015). Meta-analysis of methane yields from anaerobic digestion of dairy cattle waste. *Biomass & Bioenergy*, 86, 65–75.
- Moset, V., Al-zohairi, N., & Møller, H. B. (2015). The impact of inoculum source, inoculum to substrate ratio and sample preservation on methane potential from different substrates. *Biomass and Bioenergy*, 83, 474–482.
- Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy, J. B., Young, L. Y., & McCarty, P. L. (1979).


- Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, 13(6), 485–492.
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., & Chairprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1117–1124.
- Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment. *Water Sci Technol* 24 (8): 35–59.
- Pellera, F. M., & Gidakos, E. (2016). Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 3217–3229.
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J., & Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: a heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, 259–68.
- PERS-Nariño. (2014). Diagnóstico energético y social del departamento de Nariño. Recuperado Mayo 22, 2016, de <http://sipersn.udenar.edu.co:90/sipersn/docs/DocumentosAnalisisdeInformacion/DiagnosticoEnergeticoySociadelDepartamento.pdf>
- Rajagopal, R., Massé, D. I., & Singh, G. (2013). Bioresource Technology A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresource Technology*, 143, 632–641.
- Raposo, F., Banks, C. J., Siegert, I., Heaven, S., & Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, 41(6), 1444–1450.
- Raposo, F., Borja, R., Martín, M. A., Martín, A., de la Rubia, M. A., & Rincón, B. (2009). Influence of inoculum–substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 149(1–3), 70–77.
- Ribeiro Salomon, K. R., & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1101–1107.

- Scopus - Analyze search results. (2015). Scopus - Analyze search results. Retrieved Recuperado Octubre 15, 2015, de <http://www.scopus.com.ezproxy.unal.edu.co/term/analyzer.url?sid=6D6D55F83974E39B29D954E713CBB98A.y7ESLndDIIsN8cE7qwvy6w%3A10&origin=resultlist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28anaerobic+digestion+%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=35&count=17591&analyzeResults=Analyze+>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2014). Disposición final de residuos sólidos, Informe Nacional. <http://doi.org/ISSN: 2422-2941>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2015). Disposición Final de Residuos Sólidos, Informe Nacional. <http://doi.org/ISSN: 2422-2941>
- Tauseef, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of Environmental Management*, 117, 187–207.
- Torres, P., & Perez, A. (2010). Actividad Metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 5–14.
- UPME, IDEAM, COLCIENCIAS, U. (2014). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Recuperado Mayo 12, 2017, de [http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia\\_\\_.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia__.pdf) (Accessed May 12 2017)
- Vargas Franco, V. (2007). *Estadística descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS*. (Universidad Nacional de Colombia, Ed.Feriva S.A) (1st ed.). Cali.
- Varnero Moreno, M. T. (2011). Manual del Biogás. Recuperado Mayo 22, 2017, de <http://www.minenergia.cl/biogaslechero/wp-content/uploads/2015/12/as400s.pdf>
- Walker, L., Charles, W., & Cord-Ruwisch, R. (2009). Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes. *Bioresource Technology*, 100(16), 3799–807.
- Wu, X., Dong, C., Yao, W., & Zhu, J. (2011). Anaerobic digestion of dairy manure influenced by the waste milk from milking operations. *Journal of Dairy Science*, 94(8), 3778–86.
- Xu, S. Y., Karthikeyan, O. P., Selvam, A., & Wong, J. W. C. (2012). Effect of inoculum to

- substrate ratio on the hydrolysis and acidification of food waste in leach bed reactor. *Bioresource Technology*, 126, 425–430.
- Yan, B. H., Selvam, A., & Wong, J. W. C. (2014). Application of rumen microbes to enhance food waste hydrolysis in acidogenic leach-bed reactors. *Bioresource Technology*, 168, 64–71.
- Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion : A review. *Process Biochemistry*, 48(5–6), 901–911.
- Zarkadas, I. S., Sofikiti, A. S., Voudrias, E. A., & Pilidis, G. A. (2015). Thermophilic anaerobic digestion of pasteurised food wastes and dairy cattle manure in batch and large volume laboratory digesters: Focussing on mixing ratios. *Renewable Energy*, 80, 432–440.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392.



# Anexo A. Análisis elemental del estiércol bovino.

	FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente Laboratorio de Combustión Combustible	<b>ENTREGA DE RESULTADOS          ANÁLISIS PRÓXIMO Y          ELEMENTAL</b>
---	--	---

Informe N°:	057-16	Cliete:	UNIVERSIDAD DE NARIÑO
Fecha recepción de la muestra (a-m-d):	2016-03-01	Dirección cliente:	Ciudad Universitaria Torobajo Pasto - Nariño
Fecha análisis (a-m-d):	2016-03-07 a 2016-03-08	Cód. identificación del cliente:	M1 ESTIERCOL BOVINO
Fecha elaboración inf. (a-m-d):	2016-03-12	Cód. identificación del laboratorio:	SV022-01
Tipo de muestra:	Sólida		

Próximo			
Análisis	Método	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	6.78	
Materia Volátil (% en peso)	ASTM D 7582	65.93	70.73
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582	17.79	19.09
Carbon Fijo (% en peso)	ASTM D 3172	9.49	10.19
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	ASTM D 5865		
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	ASTM D 5865		
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0.35	0.38

Elemental			
Análisis	Norma ASTM	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	6.78	
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582	17.79	19.09
Carbono (% en peso)	ASTM D 5373	42.82	45.93
Hidrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	5.21	5.59
Nitrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	2.59	2.78
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0.35	0.38
Oxigeno (% en peso)	ASTM D 5373	24.45	26.23

Cálculo	Norma ASTM	Cómo se recibe	Seco
Poder Calorífico Inferior (BTU/Lb)	ASTM D 5865		

Observaciones:



Ing. MSc. Francisco J. Velasco S.  
 Director Técnico  
 Laboratorio de Combustión Combustibles (LCC)




El Laboratorio se responsabiliza exclusivamente por los resultados obtenidos con las muestras sometidas a ensayo. Este informe no deberá reproducirse sin previa autorización del LCC.





## Anexo B. Análisis elemental del estiércol de cuy.

	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente Laboratorio de Combustión Combustible	<b>ENTREGA DE RESULTADOS</b> <b>ANÁLISIS PRÓXIMO Y</b> <b>ELEMENTAL</b>

Informe N°:	058-16	Cliente:	UNIVERSIDAD DE NARIÑO
Fecha recepción de la muestra (a-m-d):	2016-03-01	Dirección cliente:	Ciudad Universitaria Torobajo Pasto - Nariño
Fecha análisis (a-m-d):	2016-03-07 a 2016-03-08	Cód. identificación del cliente:	M2 ESTIERCOL DE CUY
Fecha elaboración inf. (a-m-d):	2016-03-12	Cód. identificación del laboratorio:	SV022-02
Tipo de muestra:	Sólida		

Próximo			
Análisis	Método	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	10.64	
Materia Volatil (% en peso)	ASTM D 7582	65.81	73.65
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582	15.52	17.37
Carbon Fijo (% en peso)	ASTM D 3172	8.03	8.98
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	ASTM D 5865		
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	ASTM D 5865		
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0.39	0.44

Elemental			
Análisis	Norma ASTM	Cómo se recibe	Seco
Humedad Total (% en peso)	ASTM D 3302	10.64	
Cenizas (% en peso)	ASTM D 7582	15.52	17.37
Carbono (% en peso)	ASTM D 5373	39.53	44.23
Hidrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	4.68	5.23
Nitrogeno (% en peso)	ASTM D 5373	2.59	2.90
Azufre (% en peso)	ASTM D 4239	0.39	0.44
Oxigeno (% en peso)	ASTM D 5373	26.66	29.83

Cálculo	Norma ASTM	Cómo se recibe	Seco
Poder Calorífico Inferior (BTU/lb)	ASTM D 5865		

Observaciones:





Ing. MSc. Francisco J. Velasco S.  
 Director Técnico  
 Laboratorio de Combustión Combustibles (LCC)



El Laboratorio se responsabiliza exclusivamente por los resultados obtenidos con las muestras sometidas a ensayo. Este informe no deberá reproducirse sin previa autorización del LCC.



## Anexo C. Análisis físico-químico de aguas residuales lácteas

 Universidad de Nariño		SECCION DE LABORATORIOS INFORME DE RESULTADOS			Código: LBE-PRS-FR-26 Página: 1 Versión: 03 Vigente a partir de : 2014-05-19	
<b>"Laboratorio Acreditado por el IDEAM para los parametros, pH, GRASAS Y ACEITES, SOLIDOS TOTALES, SOLIDOS SUSPENDIDOS, DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO, DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO, según Resolución No 3566 del 11 de diciembre de 2014"</b>					 <small>IDEAM INSTITUTO COLOMBIANO DE ESTADÍSTICA AMBIENTAL Y CALIDAD</small> <small>Laboratorio Acreditado por el IDEAM Resolución No 1106 de 11 de diciembre de 2014</small>	
FECHA EMISION RESULTADOS:		2016-02-22		REPORTE No:		LAQ-R-08-16
AREA: LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO Y AGUAS						
DATOS USUARIO				DATOS MUESTRAS		
Solicitante:		ANALISIS DE OPORTUNIDADES ENERGETICAS EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO (ALTERNAR)		Tipo de Muestra:		AGUA RESIDUAL
Dirección:		MUNICIPIO DE CUMBAL		Tipo de Muestreo:		SIMPLE
Teléfono:		-		Sitio de Toma:		MUNICIPIO DE CUMBAL
nit:		800.118.954-1		Responsable del Muestreo:		EXTERNO: CLAUDIA ZAMBRANO
e-mail:		cvzp27@gmail.com		Fecha de Muestreo:		2016-02-02
Solicitud No:		LAQ-C-7-16		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio:		2016-02-02
TIPO DE ANALIS SOLICITADOS				FISICOQUIMICO		
Código Muestra		Descripción				
LAQ-36-16		PLANTA DE ENFRIAMIENTO CABECERA MUNICIPAL- CUMBAL				
PARAMETRO	METODO	TECNICA	UNIDAD DE MEDIDA	FECHA DE ANALISIS	CODIGO MUESTRA	
					LAQ-36-16	
PH	ESTANDAR METODOS EDICION No 22 4500 - H	ELECTROMETRICA	pH	2016-02-02	7,17	
SOLIDOS TOTALES	ESTANDAR METODOS EDICION No 222540 - B	GRAVIMETRICA	mg/L	2016-02-09	2050	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	ESTANDAR METODOS EDICION No 22 2540 - D	GRAVIMETRICA	mg/L	2016-02-09	1090	
FOSFORO TOTAL	ESTANDAR METODOS EDICION No 22 4500 P- D	COLORIMETRICA	mg P-PO4/ L	2016-02-17	11,36	
NITROGENO NTK	ESTANDAR METODOS EDICION No 22 4500 N org-C	COLORIMETRICA	mg N / L	2016-02-04	112	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	ESTANDAR METODOS EDICION No 22 5220- D	COLORIM. REF. CERRADO	mg O2/ L	2016-02-03	4200	
CARBONO ORGANICO TOTAL	METODO 10129 HACH	COLORIMETRICO	mg O2/ L	2016-02-05	595	
<b>OBSERVACIONES</b>						
DESVIACIONES / EXCLUSIONES / ACLARACIONES AL INFORME				FIN INFORME DE RESULTADOS		

LOS RESULTADO SON VALIDOS UNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA

PROHIBIDA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL SIN PREVIA AUTORIZACION DEL LABORATORIO

Elaboró:	SL 2016/2/22
Revisó:	CM 2016/02/23

**Original firmado**  
 DIANA CATHERINE MELO MUÑOZ  
 Química PQ -2666 CPQ  
 Universidad de Nariño

*Nuestro Compromiso Universitario es la Excelencia*

Ciudad Universitaria- Torobajo - Teléfonos 7315850 - 7311449 Ext. 222 - 256 Telefax 7314477 - A.A. 1175 y 1176



## Anexo D. Análisis estadístico para la prueba efecto de la inoculación y de la adición de co-sustratos en la producción de metano del estiércol bovino

```

UNIANOVA Metano BY Tratamientos
/METHOD=SSTYPE(3)
/INTERCEPT=INCLUDE
/POSTHOC=Tratamientos(DUNCAN)
/CRITERIA=ALPHA(0.05)
/DESIGN=Tratamientos.
  
```

### Análisis univariado de varianza

#### Factores inter-sujetos

		N
Tratamientos	EB	3
	EB+ARL	3
	EB+ARL+I	3
	EB+EC	3
	EB+EC+ARL	3
	EB+EC+ARL+I	2
	EB+EC+I	3
	EB+I	3

**Pruebas de efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Nm3 CH4/kg SV

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1,000 <sup>a</sup>	7	,143	60,969	,000
Interceptación	2,036	1	2,036	869,467	,000
Tratamientos	1,000	7	,143	60,969	,000
Error	,035	15	,002		
Total	2,891	23			
Total corregido	1,035	22			

a. R al cuadrado = ,966 (R al cuadrado ajustada = ,950)

**Pruebas post hoc****Tratamientos****Subconjuntos homogéneos**

Nm3 CH4/kg SV

Duncan<sup>a,b,c</sup>

Tratamientos	N	Subconjunto		
		1	2	3
EB	3	,03033		
EB+EC	3	,10000		
EB+ARL	3	,11067		
EB+I	3		,26200	
EB+EC+ARL	3		,30633	
EB+EC+I	3		,31667	
EB+ARL+I	3			,60500
EB+EC+ARL+I	2			,67100
Sig.		,080	,222	,126

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = ,002.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 2,824.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

c. Alfa = 0.05.

## Anexo E. Certificado de divulgación de resultados en evento científico de carácter internacional







## Anexo F. Certificado de divulgación de resultados en evento científico de carácter nacional



**BI-ON**  
1er Congreso **2017**  
Nacional de Bioenergía

Buenas tardes,  
Gracias por participar en la convocatoria de posters de BI-ON 2017. Es un placer informarle que su trabajo ha sido seleccionado, junto a otras 17 investigaciones, para ser exhibida en la zona de posters del Congreso. La premiación de las 3 mejores investigaciones se realizará el 28 de abril al cierre del evento.

En las próximas semanas nos comunicaremos con usted para definir la información que será incluida en el Poster.

La Cámara de Comercio de Cali otorgará 2 inscripciones sin costo para los autores de la investigación\*

\*Valor inscripción adicional de autor \$100.000

Organizan:



Apoyan:



Aliados Estratégicos:



Medio oficial:





**BI-ON 2017** 1er Congreso Nacional de Bioenergía









**CERTIFICAN QUE:**  
**ROSA CECILIA RUIZ BASTIDAS**  
Identificado con la cédula de ciudadanía N° 1030534938

Asistió al Primer Congreso Nacional de Bioenergía BI-ON 2017.  
Realizado los días 27 y 28 de abril del presente año en el Valle del Cauca

Se expide en la ciudad de Santiago de Cali el día X de mayo de 2017.



**Carlos Andrés Pérez**  
Director Económico y de Competitividad